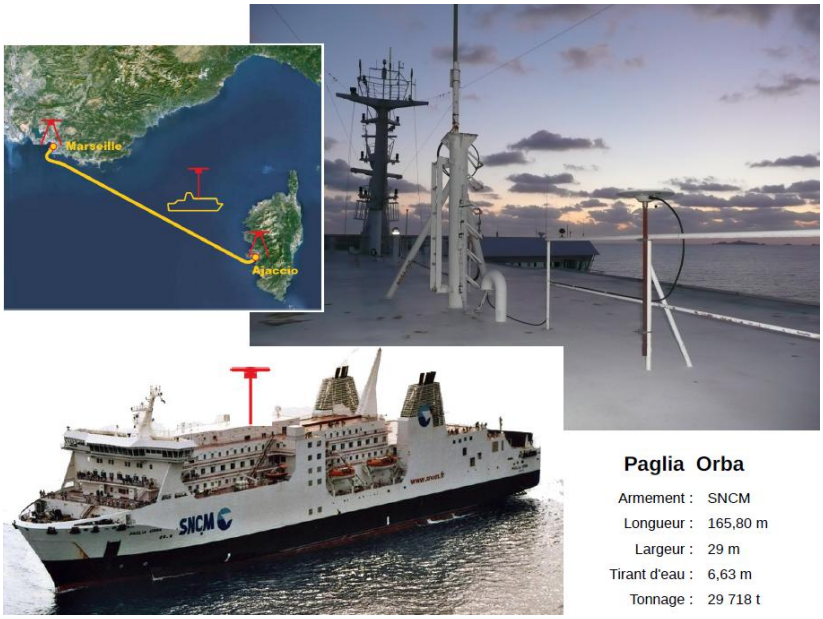
ECOLE NATIONALE DES SCIENCES GEOGRAPHIQUES

INSTITUT GEOGRAPHIQUE NATIONAL

Rapport de Stage de Fin d'Étude

Cycle des Ingénieurs de l'ENSG 3ème année (IT3)

Traitement et Analyse des délais troposphériques issus des données d'un récepteur GPS bifréquence embarqué sur un navire



Mohamed Ali EL YAHMADI

Le 28 Septembre 2009, soutenance du rapport

☑ Non confidentiel ☐ Confidentiel IGN ☐ Confidentiel Industrie ☐ jusqu'au ……

ECOLE NATIONALE DES SCIENCES GEOGRAPHIQUES
6 et 8 avenue Blaise Pascal - Cité Descartes - Champs sur Marne - 77455 MARNE-LA-VALLEE CEDEX 2
Téléphone 01 64 15 31 00 Télécopie 01 64 15 31 07

Jury

Président du jury

Michel KASSER, directeur de l'ENSG

Commanditaire:

IGN/SGN ; Laboratoire Géosciences Montpellier

Encadrement de projet:

Alain Harmel, SGN, IGN, maître de stage

Serge Botton, ENSG, DPTS, professeur référent

Jacques Belin, ENSG, DPTS, professeur référent

Responsable du cycle Ingénieur : Serge BOTTON, direction des études (DPTS), ENSG

Tuteur de troisième année : Michel LANSMAN, direction des études (DFI), ENSG

Tuteur stage pluridisciplinaire : Michel LANSMAN, direction des études (DFI), ENSG

© ENSG

Stage Pluridisciplinaire du 13 avril au 11 septembre 2009

Situation du document:

Rapport du stage présenté en fin de 3ème année du cycle IT

Nombre de pages : 94 dont 24 annexes

Système hôte : Word 2003

MODIFICATIONS

EDITION	REVISION	DATE	PAGES MODIFIEES
1	0	01/09/2009	Première version
	1	11/09/2009	Version finale rendue à l'école

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement mon maitre de stage Alain Harmel pour son aide, ses explications et ses conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie aussi les personnes qui m'ont aidé et qui ont contribué au bon déroulement du stage :

-Thierry Person pour m'avoir proposé ce travail.

-Françoise Duquenne pour m'avoir accepté dans les locaux du SGN.

-Eric Doerflinger et Karen Boniface pour m'avoir accueilli à Géoscience Montpellier, pour leur sympathie et pour m'avoir expliqué les applications du GPS dans le domaine de la météorologie.

-et encore Samuel Branchu, Romain Fages.

Je garde un très bon souvenir de l'accueil au SGN et de l'ambiance du travail. Merci à tous pour leur gentillesse.

Nous remercions également la SNCM (Société Nationale Maritime Corse Méditerranée) et plus particulièrement Monsieur Jacques VINCENT, d'avoir mis gracieusement à notre disposition les moyens humains et matériels pour réaliser les mesures GPS sur le Navire Paglia Orba de la compagnie.

Résumé

Mots clés :

GPS sur navire, Délai Total Zénithal, Positionnement Ponctuel Précis, Positionnement cinématique

Ce stage se déroule à l'Institut Géographique National au sein du Service de Géodésie et Nivellement. Il s'inscrit dans le cadre du projet VAPIMED (VAPeur d'eau, Pluie intense en MEDitérranée).

L'objectif principal de ce stage est de déterminer le délai zénithal total à partir des données GPS collectées sur un bateau. Un outil a déjà été développé au sein du SGN permettant de faire du traitement ponctuel précis en mode cinématique. Pour traiter les données de toute la campagne, Il fallait donc paramétrer ce noyau de calcul, l'adapter au besoin et l'automatiser.

La comparaison des résultats avec divers centres de calcul et avec les stations du RGP a permis de valider la méthode de calcul et d'évaluer la précision des résultats.

Abstract

Keywords:
GPS on ship, Zenith total delay, Precise point positioning, Kinematic positioning

This training course takes place at the National Geographical Institute within the department of "Service de Géodésie et Nivellement". It lies within the scope of the project VAPIMED (VAPeur d'eau, Pluie intense en MEDitérranée).

The main aim of this training course is to determine the zenith total delay from data collected on a ship. A tool was already developed in the SGN. Data from GPS can be processed with this tool in precise point positioning mode and kinematic treatment. To process all data of the campaign, it is necessary to parameterize the tool, adapt it to the need and automat it.

The comparison of the results with various centers of calculation in PPP and the solution made by RGP allow to validate the whole of results and to evaluate the precision.

Table des matières

REMERCIEMENTS 3
RESUME 4
ABSTRACT 5
TABLE DES MATIERES 6
LISTE DES TABLEAUX 8
LISTE DES FIGURES 9
LISTE DES ANNEXES 11
GLOSSAIRE ET SIGLES UTILES 12
INTRODUCTION 14
I.PRESENTATION DU PROJET 15
1. Service de Géodésie et Nivellement (SGN) 15
2. Contexte, le projet VAPIMED 16
3. Objectifs 17
II.LE POSITIONNEMENT PONCTUEL PRECIS (PPP) 18
1. Principe de positionnement 18
2. Eliminations des postes d'erreurs 19
III.MODELISATION DE LA TROPOSPHERE DANS LES MESURES GPS 21
1. Introduction 21
2. Stratégie d'estimation 22
IV.PRESENTATION DES LOGICIELS DE TRAITEMENT 23
1. Présentation du Bernese 23
2. Kin_PPP 24
V.METHODOLOGIE DE TRAITEMENT 25
1. Chaîne de calcul 25
2. Choix des paramètres 31
3. Validation de la méthode de calcul 38
4. Automatisation des calculs 49
VI.RESULTATS 53
1. Traitement à 30s 53
2. Comparaison entre traitements à 30 s et à 5s 58
3. Surface de la mer 62
CONCLUSION 68
BIBLIOGRAPHIE 69
ANNEXES 71
ANNEXE 1 : POSTES D'ERREUR GPS 72
ANNEXE 2 : MODELISATION DU RETARD TROPOSPHERIQUE 78

ANNEXE 3 : LOGICIEL BERNESE 85
ANNEXE 4 : CHAINE DE CALCUL 88
ANNEXE 5 : RESULTATS 94

Liste des tableaux

Tableau 1 ✔ Postes d'erreurs *20*
Tableau 2 ✔ Structure générale des dossiers du répertoire GPSUSER *26*
Tableau 3 ✔ Tests des paramètres *33*
Tableau 4 ✔ Comparaison des ZTDs bateau avec ZTD issu des données des stations proches *40*
Tableau 5 ✔ Comparaison des coordonnées avec la solution RGP *41*
Tableau 6 ✔ Comparaison ZTDs avec la solution RGP *45*
Tableau 7 ✔ Comparaison entre la solution SGN, NRCan et GAPS *49*

Liste des figures

Figure 1 ✔ Installation du GPS sur le bateau *16*
Figure 2 ✔ Diagramme fonctionnel du traitement en PPP *25*
Figure 3 ✔ Variation du ZTD en fonction de la contrainte relative *34*
Figure 4 ✔ Variation du ZTD en fonction de l'angle de coupure et l'utilisation des gradients horizontaux *35*
Figure 5 ✔ Variation du ZTD en fonction des paramètres de détection de saut de cycle et observations hors norme *36*
Figure 6 ✔ Comparaison du ZTD avec les stations proches du RGP *38*
Figure 7 ✔ Comparaison du ZTD ave les stations proches du RGP *40*
Figure 8 ✔ Dispersion du nuage de point d'une solution PPP *42*
Figure 9 ✔ Série temporelle de la solution PPP *42*
Figure 10 ✔ Effet des marées terrestres sur les séries temporelles *43*
Figure 11 ✔ Déplacement d'une station sous l'effet des marées terrestres *43*
Figure 12 ✔ Comparaison du ZTD issu du noyau de calcul avec la solution journalière du RGP_EGVAP pour la station de PRIE *45*
Figure 13 ✔ Comparaison du ZTD issu du noyau de calcul d'autres centres de calcul en PPP *46*
Figure 14 ✔ Comparaison de la hauteur ellipsoïdale issue du noyau de calcul d'autres centres de calcul en PPP *47*
Figure 15 ✔ Ecart des séries temporelles issues du noyau de calcul et ceux d'autres centres de calcul en PPP *48*
Figure 16 ✔ Interface de traitement *50*
Figure 17 ✔ Trajet du bateau *53*
Figure 18 ✔ Hauteur au-dessus de l'ellipsoïde le long du trajet du bateau *54*
Figure 19 ✔ Délai zénithal total *56*
Figure 20 ✔ ZTD et précipitation *56*
Figure 21 ✔ Composante hydrostatique du ZTD *57*
Figure 22 ✔ Composante humide du ZTD *57*
Figure 23 ✔ Quantité de vapeur d'eau *58*
Figure 24 ✔ Comparaison du ZTD entre le traitement à 30 s et à 5s *59*
Figure 25 ✔ Ecart du ZTD entre le traitement à 30 s et à 5s *59*
Figure 26 ✔ Ecart entre les séries temporelles entre le traitement à 30 s et à 5s *60*
Figure 27 ✔ Ambigüités estimées pour un traitement à 30s (a) et un traitement à 5s (b) *61*
Figure 28 ✔ Variation de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde le long du trajet du bateau *62*
Figure 29 ✔ Lissage et filtrage de la série temporelle de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde *63*
Figure 30 ✔ Directions principales suivies par le bateau *64*
Figure 31 ✔ Lissage de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde suivant une direction *64*
Figure 32 ✔ Surface approximative de la surface du géoïde *65*

Figure 33 ✔ Comparaison avec le modèle de géoïde EGM08 ..... *66*
Figure 34 ✔ Ecart par rapport au modèle de géoïde *66*
Figure 35 ✔ Géométrie de l'allongement troposphérique du signal GPS *78*
Figure 36 ✔ TILTING de la zénithal troposphérique avec un angle β *82*
Figure 37 ✔ Digramme fonctionnel des modules Bernes pour la détermination de l'orbite et les paramètres de rotation de la terre *88*
Figure 38 ✔ Dispersion du nuage de points de la station AJAC calculés en PPP *90*
Figure 39 ✔ Série temporelle de la station AJAC *90*
Figure 40 ✔ Dispersion du nuage de points de la station PRIE calculés en PPP *91*
Figure 41 ✔ Série temporelle de la station PRIE *91*
Figure 42 ✔ Dispersion du nuage de points de la station MARS calculés en PPP *92*
Figure 43 ✔ Série temporelle de la station MARS *92*
Figure 44 ✔ Comparaison du ZTD issu du noyau de calcul avec la solution journalière du RGP_EGVAP pour la station de MARS *93*
Figure 45 ✔ Comparaison du ZTD issu du noyau de calcul avec la solution journalière du RGP_EGVAP pour la station d'AJAC *93*
Figure 46 ✔ Comparaison des ZTD entre deux traitements 30s et 5s *94*

Liste des annexes

Annexe 1 : Postes d'erreur GPS *72*
Annexe 2 : Modélisation du retard troposphérique *78*
Annexe 3 : Logiciel Bernese *85*
Annexe 4 : Chaîne de calcul *88*
Annexe 5 : Résultats *94*

Glossaire et sigles utiles

BPE	Bernese Processing Engine
DCB	Differential Code Bias
DORIS	Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite
EGVAP	The EUMETNET GPS water vapour programme
EPN	European Permanent Network
GAPS	GPS analysis and Positionning Software
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GMT	Generic Mapping Tools
GPS	Global Positioning System
HyMeX	HYdrological cycle in the Mediterranean EXperiment
IGN	Institut Géographique National
IGS	International GNSS Service
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
LEFE	Les Enveloppes Fluides et l'Environnement
NRCan	Natural Resources canada
PCF	Process Control File

PPP	Positionnement Ponctuel Précis
RGP	Réseau gps permanent
RTNet	Real Time NETwork processing engine
SAA	Service des Activités Aériennes
SGN	Service de Géodésie et Nivellement.
TGD	Délai Différentiel de Groupe
VAPIMED	VAPeur d'eau, Pluie intense en MEDitérranée
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay
ZTD	Zenith Total Delay
ZWD	Zenith Wet Delay

INTRODUCTION

En traversant la troposphère, l'onde électromagnétique GPS subit un retard dû à la réfraction. L'analyse des observations GPS permet de fournir un délai troposphérique total rapporté au zénith qui peut être décomposé en partie hydrostatique liée à la pression et une partie humide qui permet de déduire la quantité de vapeur d'eau. La connaissance de cette dernière permet de réaliser des prédictions météo fiables.

Une mission de collecte de données à partir d'un GPS sur un bateau a été effectuée pendant un période d'environ 4 mois afin de faire des mesures de vapeur d'eau.

Le but de ce travail qui s'est déroulé à l'Institut Géographique National au sein du Service de Géodésie et Nivellement a été de déterminer le délai troposphérique zénithal total et de le décomposer en sa partie hydrostatique et humide à partir des données GPS collectées.

Dans ce but, les données ont été traitées en faisant du positionnement ponctuel précis en mode cinématique. Des tests ont été faits sur le traitement d'une semaine de données pour choisir les paramètres adéquats. Une interface a été développée pour automatiser le traitement de la campagne et faciliter l'analyse des résultats. Dans le but de valider les résultats obtenus, Ils ont été comparés à différents centres de calcul et aux solutions journalières du RGP.

Une fois le traitement est réalisé, on dispose en chaque point du trajet du bateau de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde. Une méthode sera proposée pour déterminer une surface équipotentielle proche de la surface du géoïde.

I. PRESENTATION DU PROJET

1. Service de Géodésie et Nivellement (SGN)

Ce stage a été réalisé au sein du Service de Géodésie et Nivellement (SGN) à l'Institut Géographique National.

Les activités du service s'articulent autour de six unités :

- L'équipe Produits-Développements : Mise au point et maintient de nouveaux processus de production en suivant l'évolution technologique, ainsi que des nouveaux produits. Les domaines d'activité actuels sont : processus de contrôle et entretient des réseaux, GNSS, mise en place de service de calcul GPS en ligne, modernisation de la base de données géographique et Etudes instrumentales.

- Les réseaux matérialisés de géodésie et de nivellement : Elle assure l'entretien de l'ensemble des réseaux matérialisés en France qui sont représentés par un ensemble de points (bornes géodésiques, repère de nivellement…).

- Les réseaux de stations GPS permanents : Maintien et diffusion des données collectées à partir des stations du réseau GPS permanent de la France.

- Réseaux et services internationaux : représente un centre de données IGS, centre d'analyse EPN et maintient et collecte des données du réseau de balises du système DORIS.

- L'information géodésique : Les activités de cette unité sont la gestion de la base de données géodésique, publication des notices techniques, mise en production de systèmes précis et développement d'outils de conversion de coordonnées.

- Les travaux spéciaux : Ils assurent, à la demande, des tâches d'assistance et conseil pour la rédaction de Cahier de Clauses Techniques Particulières, des expertises sur des travaux réalisés ou en cours de réalisation, des contrôles de conformité, des mesures et implantations diverses ou tous travaux ayant besoin de compétences particulières dans le domaine de la mesure topométrique de précision ou du développement pour le traitement de données.

2. Contexte, le projet VAPIMED

Depuis quelques années, l'assimilation des délais troposphériques dans les modèles météorologiques a permis d'améliorer sensiblement les prévisions de précipitation sur le continent. L'enjeu est maintenant de tester la faisabilité de la méthode en mer, où les données météorologiques manquent cruellement. Dans ce but a été réalisé le projet VAPIMED (VAPeur d'eau, Pluie intense en MEDitérranée).

Le projet s'inscrit dans le cadre du programme LEFE de l'INSU. Ce programme vise à étudier les phénomènes hydrologiques au-dessus de la Méditerranée. Le but de ce projet est de faire des mesures expérimentales de la vapeur d'eau par GPS sur plateformes mobiles. Ces travaux s'inscrivent dans la phase préparatoire d'HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment).

Afin d'évaluer la validité des mesures d'humidité GPS sur plateformes mobiles, un récepteur GPS a été installé dans le cadre du projet VAPIMED du 13/09/08 (jour 257) au 25/01/2009 (025) sur le ferry Paglia Orba réalisant la ligne Marseille-Ajaccio.

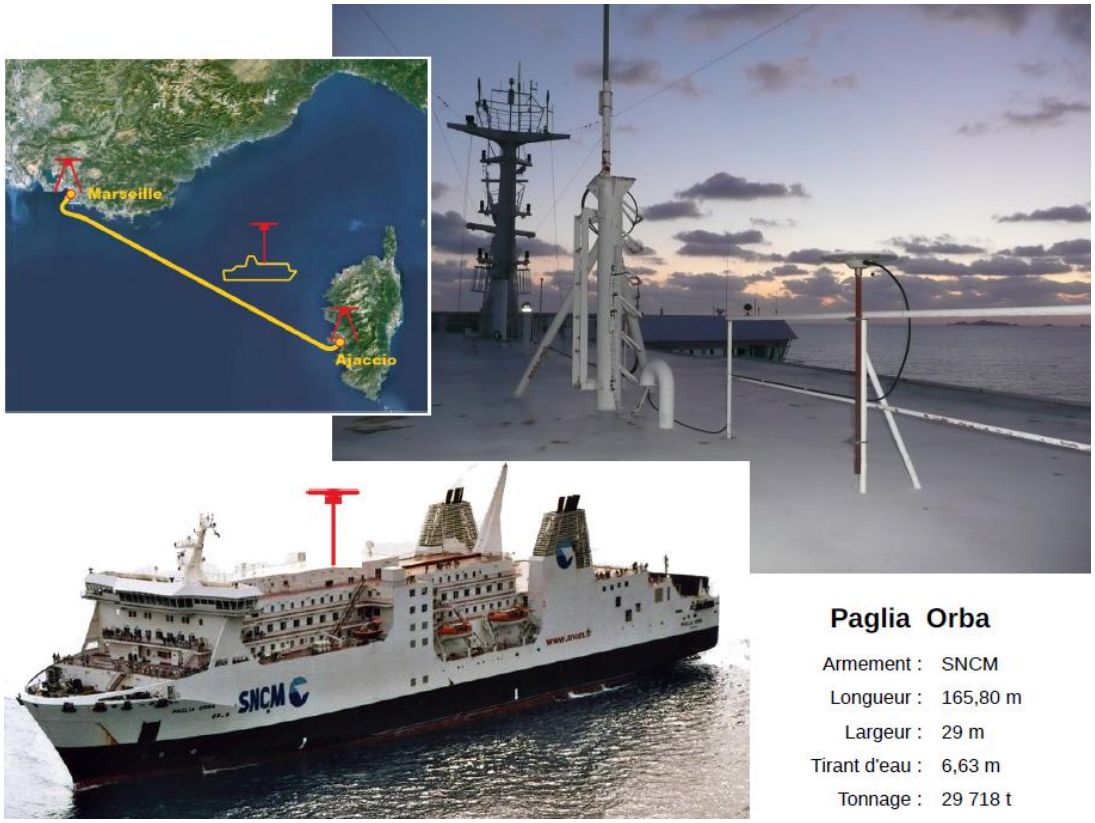


Figure 1 ✔ Installation du GPS sur le bateau

Extrait du rapport de C. Champollion (Géoscience Montpellier)

3. Objectifs

Au sein du SGN un outil a été développé par Alain Harmel pour le calcul de la trajectographie pour le SAA en mode PPP cinématique. Il permet entre autres de déterminer le délai zénithal total.

L'objectif est donc d'utiliser cet outil et de l'adapter pour traiter la campagne. Dans ce but, Il fallait :

- Modifier l'outil : le noyau de calcul prend en compte plusieurs options de calcul qui sont principalement dédiées à la prise de vue aérienne et permet aussi de densifier la trajectoire. Il faut donc modifier ce code et ne conserver que les modules propres au bateau.

- Choisir les paramètres des panneaux de Bernese qui permettent d'avoir une meilleure estimation du délai zénithal troposphérique tels que les contraintes entre chaque époque, angle de coupure, utilisation des gradients horizontaux….

- Analyser et valider les résultats : il faut comparer ces résultats aux ZTDs des stations du RGP les plus proches et à différents sites de calcul en ligne en mode PPP cinématique.

- Automatiser les traitements : la campagne contient environ 136 jours d'observation. Pour faire varier les paramètres de traitement automatiquement, Il est donc nécessaire de faire un script, d'où la nécessité de développer une interface pour lancer le traitement, analyser les résultats et générer un rapport de calcul détaillé.

- Proposer une approche pour déterminer une surface proche de la surface du géoïde.

Avant de présenter la stratégie de traitement, j'expliquerai tout d'abord le principe du positionnement en mode PPP et ensuite comment on modélise le retard troposphérique dans les mesures GPS.

II. LE POSITIONNEMENT PONCTUEL PRECIS (PPP)

1. Principe de positionnement

Le Positionnement Ponctuel Précis est une technique de positionnement non différentiel. Elle consiste à calculer une position GPS (statique ou cinématique) pour une station donnée en utilisant les observations de phase et de code pour les deux fréquences, ainsi que les orbites précises, les corrections d'horloge satellite et les paramètres de rotation de pôle. On estime les paramètres propres à la station : les coordonnées, les corrections de l'horloge du récepteur et les paramètres de troposphère.

L'avantage du PPP est de diminuer de manière significative le temps de calcul puisqu'une seule station est traitée. Le temps de calcul augmente linéairement avec le nombre de stations du PPP et non de manière géométrique comme pour un traitement différentiel en réseau. Cependant, la précision des résultats dépend de la précision des orbites, des horloges des satellites, de la géométrie et de la possibilité d'éliminer les différents postes d'erreur.

Le choix de ce mode de positionnement a divers conséquences :

- Le référentiel est défini par le référentiel des orbites. Du fait que le PPP n'est pas une technique différentielle, le référentiel géodésique ne peut être défini au moyen de contraintes sur des stations de références. Il est imposé donc par les données satellitaires (orbites, horloges).

- Les corrections d'horloges des satellites ne sont pas estimées mais supposées connues. Elles sont introduites dans les processus conjointement aux éphémérides et aux paramètres d'orientation de la terre (EOP). La cohérence des orbites, des EOP et des corrections d'horloge est indispensable pour obtenir une grande précision. Il est donc impératif d'utiliser des données provenant du même centre de calcul. Mélanger les orbites et les horloges provenant de différents centres d'analyse dégrade les résultats du PPP.

- Il est souhaitable que les modèles utilisés pour estimer les orbites et les corrections d'horloge soient les mêmes que ceux implémentés dans le logiciel de traitement. Cela ne pose pas de problème si les produits de CODE ou de l'IGS sont utilisés avec le Bernese.

A la différence du positionnement relatif, les effets qui seraient communs aux stations d'une ligne de base ne disparaissent pas dans le PPP, ni ne sont minimisés.

- Les mouvements du site dus à des phénomènes géophysiques tels que les mouvements tectoniques, les marées terrestres et surcharge océanique.

- les erreurs d'observation telles que les effets de la troposphère, de l'ionosphère, le multi-trajet.

- les effets dus aux satellites : les horloges, l'excentricité du centre de phase de l'antenne, le délai différentiel de groupe (TGD), la relativité et la phase initiale de l'antenne satellite et récépeteur.

Une description plus détaillée des différents postes d'erreurs dans l'annexe1 : Postes d'erreurs GPS

Le PPP est un moyen efficace et rapide de calcul de bonnes coordonnées pour une station mais sans atteindre la qualité issue d'un calcul de réseau, à cause principalement de l'impossibilité de résoudre les ambigüités de phase et de la non-prise en compte des corrélations entre les stations et les corrections d'horloges. Par contre, cette méthode permet de détecter les stations à problèmes puisque les fautes ne seront plus dissimulées dans le réseau et ne seront plus compensées. Pour avoir une position précise il faut donc éliminer les postes d'erreurs.

2. Eliminations des postes d'erreurs

Dans l'équation d'observation GPS on a une partie théorique de la mesure et une partie non théorique qui est le résultat des postes d'erreurs. Trois méthodes peuvent être utilisées pour traiter cette partie résiduelle :

- Estimation : On estime les valeurs de ces termes en même temps que les inconnues principales. Cette méthode possède deux inconvénients. Le premier est que le nombre de paramètres que l'on peut estimer est limité par la quantité d'observations dont on dispose. Le second est qu'en augmentant le nombre de paramètres estimés, on affaiblit la détermination des inconnues principales et on limite donc ainsi la précision obtenue sur ces inconnues principales.
- Modéliser : l'intérêt de cette technique pour diminuer l'écart entre modèle et observation dépend essentiellement de la capacité du modèle utilisé à décrire le

comportement du terme secondaire. Plus la valeur du terme résiduel sera importante, moins la méthode sera efficace.

- Eliminer : par combinaison linéaires de mesures. Cette méthode donne d'excellents résultats. Mais elle a deux inconvénients :
    - Le bruit associé à la combinaison de mesures est plus important que le bruit initial sur chaque mesure
    - Les différentes mesures obtenues par combinaison peuvent être corrélées entre elles, même si les mesures brutes sont indépendantes.

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des postes d'erreur et la méthode de traitement en PPP.

Poste d'erreur	Traitement
Orbite et Horloge satellite	Utilisation des produits IGS : orbites précise (2.5cm toutes les 15mn) et horloges à 30s (75ps RMS)
Décalage de centre de phase du satellite	On utilise un fichier de correction "SATELLIT.I05"
Phase Wind Up	La correction est prise en compte par les centres de calcul d'orbites et dans le logiciel Bernese
DCB et TGD	On utilise un fichier de correction pour chaque satellite "P1C1.DCB". Le TGD est corrigé par le constructeur.
Variation de centre de phase du récepteur	Utiliser un fichier de calibration "PHAS_SGN.I05"
Bruit du récepteur	négligeable
Multi-trajet	Eviter les endroits réfléchissants, choix de l'angle de coupure, antenne à plan absorbant
Saut de cycle	Détection des sauts de cycle et marquage avec des combinaisons linéaires d'observations
Délai Troposphère	Utilisation d'un modèle pour minimiser l'erreur et estimer la partie résiduelle
Délai Ionosphère	Elimination par combinaison linéaire de phase L3
Effet de marée terrestre	Utilisation d'un modèle de marée tide2000 conforme aux conventions de l'IERS2000
Effet de surcharge océanique	Utilisation d'un modèle de surcharge Fes2004.

Tableau 1 ✔ Postes d'erreurs

III. MODELISATION DE LA TROPOSPHERE DANS LES MESURES GPS

1. Introduction

La troposphère est la partie basse de l'atmosphère. Elle s'étend du sol à environ 10km. C'est un milieu non dispersif pour les fréquences inférieures à 15 GHz. Donc le délai troposphérique est identique pour les mesures sur L1 et L2 et il ne peut pas être éliminé par combinaison linéaire des fréquences.

Lorsque le signal GPS se propage dans cette couche de l'atmosphère, il y subit l'effet de la variation de l'indice de réfraction, ce qui se traduit par deux phénomènes : le retard de propagation et la courbure de la trajectoire.

On divise en général ce retard en deux termes. Un premier, appelé retard hydrostatique, de l'ordre de 2,3 m au zénith et très peu variable. Il représente environ 90% du ZTD. Il dépend de la densité totale de l'air. Il varie donc peu et peut être modélisé entièrement à partir des données météorologiques de surface. Le second terme représente le retard humide. Il peut fluctuer de 5 cm à 25cm au zénith et traditionnellement beaucoup plus variable dans le temps et représente les 10% qui reste. Le caractère aléatoire de ces fluctuations rend difficile la correction a priori du retard car il est très peu corrélé avec les données météorologiques de surface et dépend du profil de densité de vapeur d'eau

La composante zénithale du retard troposphérique (ZTD) est estimée au cours du traitement, une fonction de rabattement (appelé fonction de projection) décrivant sa dépendance en élévation. La modélisation de la troposphère au cours du traitement suit alors le formalisme de l'´equation suivante :

$$\Delta L^{tropo} = \Delta L_d^{tropo,z} mf_d + \Delta L_w^{tropo,z} mf_w$$

Ou : $\Delta L_d^{tropo,z}$: Retard hydrostatique au zénith.

$\Delta L_w^{tropo,z}$: Retard humide au zénith.

mf_d : Fonction de projection hydrostatique.

mf_w : Fonction de projection humide.

2. Stratégie d'estimation

Actuellement, dans le traitement GPS on estime le délai troposphérique de la façon suivante :

- On détermine les valeurs a priori du retard total à l'aide d'un modèle.
- On estime une correction de la valeur a priori.

Deux modélisations mathématiques peuvent être utilisées : déterministe (par moindres carrés) et stochastique (filtrage de Kalman). Dans le Bernese on fait une estimation par moindres carrés.

Dans le logiciel Bernese, il est recommandé d'utiliser un modèle a priori de "Saastamoinen" avec la fonction de projection "dry_niell" et d'estimer une correction ramenée au zénith en utilisant la fonction de projection "wet_niell". Ces deux composantes ne représentent pas la partie hydrostatique et la partie humide. Dans notre cas, le modèle a priori n'est pas calculé à partir de la pression en chaque époque. On utilise la première position et un modèle standard de pression et de température pour calculer une valeur constante sur toute la journée. Par la suite on utilise la fonction de projection "dry_niell" pour la ramener au zénith. Enfin on estime une correction de cette valeur.

Le résultat à exploiter est donc le retard total qui est la somme de ces deux composantes. Pour pouvoir décomposer le délai zénithal total en ses deux parties hydrostatique et humide, il faut disposer de la pression. Grace à cette dernière on va pouvoir calculer la composante hydrostatique à l'aide de la formule de "Saastamoinen 1972". Puis elle est déduite du délai zénithal total pour obtenir la partie humide. Ce dernier est utilisé pour calculer la quantité de vapeur d'eau.

Une description plus détaillée du délai troposphérique, de l'indice de réfraction, des modèles de troposphère, des fonctions de projection et des gradients horizontaux se trouve dans l'annexe 2 : Modélisation du retard troposphérique.

IV. PRESENTATION DES LOGICIELS DE TRAITEMENT

1. Présentation du Bernese

Le logiciel « Bernese GPS Software 5.0 » est un logiciel scientifique de traitement des données GPS, GLONASS. Ce logiciel a été développé à l'université de Berne en Suisse. Il est utilisé dans les traitements des réseaux permanents pour du positionnement précis, la détermination d'orbites, l'estimation des paramètres de rotation du pôle, le calcul de modèles ionosphériques et troposphériques, la calibration d'antennes. Le logiciel Bernese est utilisable sur différentes plateformes (Windows, UNIX, LINUX).

Le traitement peut être fait de deux façons : soit en mode interactif soit en mode automatique. Ce qui nous intéresse est le deuxième mode. Ce mode est accessible via le BPE.

Le Bernese Processing Engine (BPE) permet d'automatiser les procédures de calcul, la stratégie de calcul étant prédéfinie par l'utilisateur : de la transformation des fichiers RINEX jusqu'au résultat final, le BPE lance les différentes tâches les unes après les autres ainsi que les différents programmes du Berne utilisés en faisant appel à des panneaux pré-paramétrés. La liste des scripts lancés est donnée par un fichier PCF (Process Control File).

Le fichier PCF définit la liste des scripts qui seront lancés. En plus du nom des scripts, il contient des informations sur :

- Le nom du répertoire contenant les panneaux d'options lus par les scripts.
- L'ordre dans lequel les processus doivent être lancés. Cet ordre est défini en donnant le numéro d'identification du script et le numéro d'identification du script précédent dont il faut attendre la fin.
- Des variables qui peuvent éventuellement être définies à cet endroit.

Les répertoires d'option OPT contiennent les panneaux d'options pré-préparés. Il y a deux types de panneaux, des panneaux communs à chaque répertoire et des panneaux correspondant au programme appelé par le script.

Le but du BPE est donc de pouvoir automatiser les calculs quand on a beaucoup de sessions et de configurations identiques.

De plus on peut coupler le BPE avec un environnement de développement tel que Perl. De ce fait on dispose de toutes les fonctionnalités du langage de programmation et d'un ensemble de tâches bien définies par le BPE. Donc on peut par exemple développer une interface permettant de traiter une campagne de mesure et d'analyser les résultats en combinant le langage de programmation et le BPE.

Une description plus détaillée du logiciel Bernese se trouve dans l'annexe 3 : Logiciel Bernese.

2. Kin_PPP

C'est un programme développé par Alain Harmel (SGN) permettant de calculer une trajectoire d'un GPS embarqué sur un mobile en utilisant le positionnement ponctuel précis en mode cinématique. Ce logiciel est utilisé pour les missions aériennes du SAA (Prise de vue aérienne et cas du lidar) afin de trouver une solution approchée pour le sommet de prise de vue.

L'interface de ce programme permet de choisir le fichier à traiter, le type de mobile, les options de traitement, le pas d'échantillonnage. Le programme fait appel à un certain nombre de panneaux et scripts de Bernese ainsi que des scripts spécifiques développés par Alain Harmel (SGN).

L'enchaînement des calculs est géré par un script perl "kin_ppp.pl". Ce programme gère l'ensemble des tâches appelées de la mise à jour des dossiers jusqu'à la mise en référence des résultats.

Pour traiter la campagne VAPIMED, on va utiliser ce noyau de calcul en l'adaptant au cas du bateau parce qu'il permet aussi d'estimer le délai zénithal total. L'idée est donc de modifier ce script, les PCFs appelés et les paramètres des panneaux du Bernese afin d'avoir une meilleure estimation du délai zénithal total. Cela revient à supprimer toutes les options qui se ramènent au cas de l'avion ainsi que le module qui permet de faire une densification de la trajectoire. Il faut aussi modifier la structure des dossiers de Bernese.

Par la suite, il faut développer une interface qui permette de lancer le noyau de calcul modifié pour traiter plusieurs sessions et stations à la fois, analyser les résultats, visualiser des graphiques des résultats et générer un rapport détaillé de calcul par session.

V. METHODOLOGIE DE TRAITEMENT

1. Chaîne de calcul

Le mode de positionnement utilisé est du PPP en mode cinématique. Les caractéristiques principales du traitement sont :

- La cinématique : Il s'agit de déterminer la trajectoire d'un récepteur embarqué sur un mobile, c'est-à-dire, une position par époque d'observation.

- Le positionnement ponctuel précis : Il s'agit de déterminer la position la plus précise sans utiliser les données d'une station observant simultanément au sol ou d'un réseau permanant.

a) Structure générale du traitement

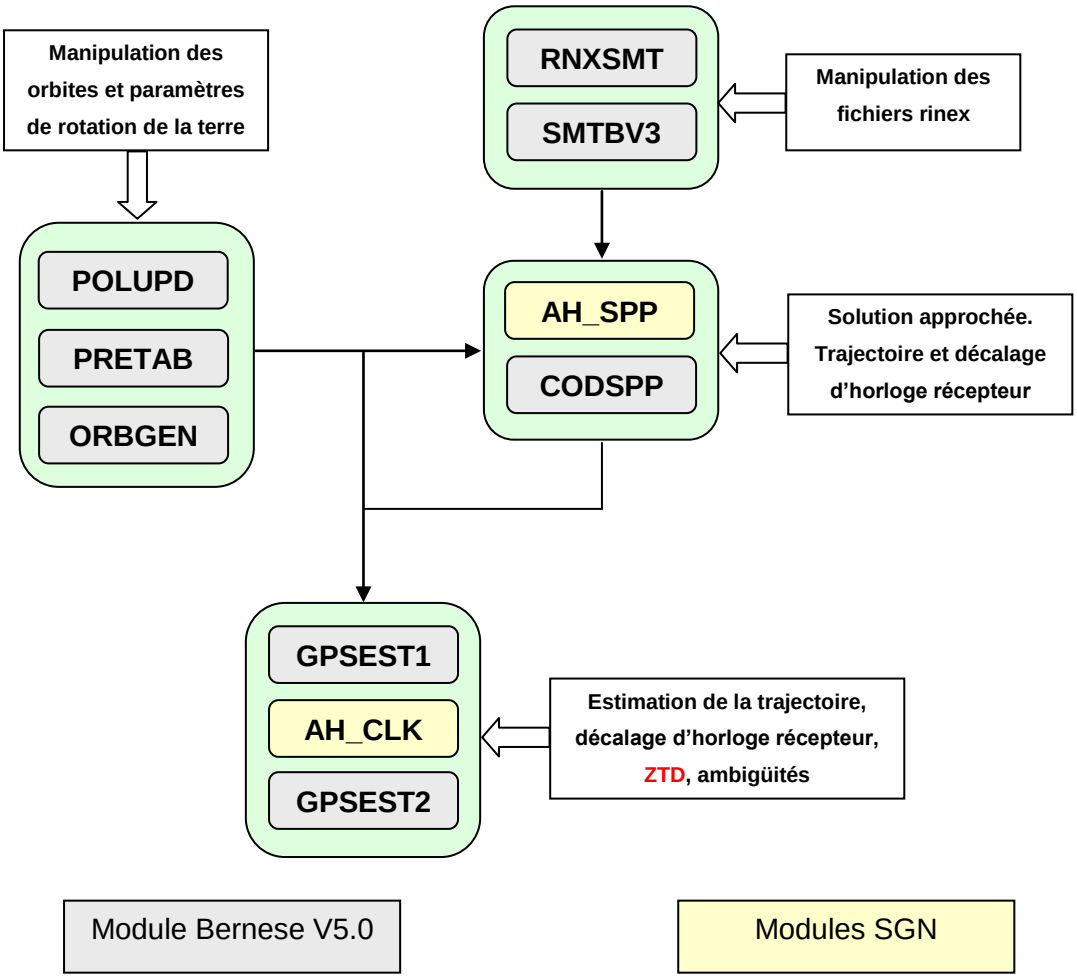


Figure 2 ✔ Diagramme fonctionnel du traitement en PPP

Le diagramme précédent montre comment s'emboitent les différents modules de Bernese et les modules développés au SGN pour faire du positionnement ponctuel précis. Du point de vue fonctionnel ces modules sont organisés sous forme de PCFs et seront lancés par un script perl "VAPI_kin_ppp.pl". C'est une version modifiée du noyau de calcul kin_ppp.pl. Les modifications concernent la suppression de toutes les options de calcul conçues pour le lidar, le temps d'échantillonnage et la transformation des coordonnées et la suppression du module de densification qui intervient à la fin de chaîne de traitement pour générer une trajectoire plus dense (en fonction de l'échantillonnage initial). Dans le cas du bateau ce module n'est pas nécessaire.

Le script fait appelle aussi à des programmes intermédiaires tels que gzip.exe, rnx2crx.exe, teqc.exe…. Ces interactions sont gérées par le script perl "VAPI_kin_ppp.pl. L'enchainement des modules Bernese est décrit par des PCFs

Les premiers pas étaient de comprendre comment marche la chaîne de traitement actuelle et de la modifier en l'adaptant à la campagne VAPIMED.

b) Structure générale des dossiers du répertoire GPSUSER

OPT	Panneaux	PCF	SCRIPT
VAPI_KIN	POLUPD.INP PRETAB.INP ORBGEN.INP	VAPI_KIN_COP0	KIN_COP2 POLUPD PRETAB ORBGEN
VAPIRXST	RNXSMT.INP	VAPI_RXST	RNXSMT
VAPRXST5	RNXSMT.INP	VAPI_RXST5	RNXSMT
VAPI_PPP	RXOBV3.INP	VAPI_KIN_PPP	SMTBV3
VAPI_TST	AH_SPP.INP		AH_SPP
VAPI_PPP	CODSPP.INP GPSEST.INP AH_CLK.INP		CODSPP GPSEST AH_CLK
VAPIPPP3	GPSEST.INP		GPSEST

Tableau 2 ✔ Structure générale des dossiers du répertoire GPSUSER

Dans chaque dossier d'option on ajoute 5 panneaux : MENU.INP; MENU_CMP.INP; MENU_EXT.INP; MENU_PGM.INP; MENU_VAR.INP.

En plus des scripts perl on fait appel à d'autres scripts et exécutables du dossier GPSTOOLS.

Le noyau de calcul permet de lancer les différentes tâches décrites dans les PCFs depuis la vérification du fichier rinex jusqu'à la mise en forme du résultat de traitement.

Les programmes appelés sont :

- POLUPD: Conversion des fichiers de paramètres de rotation du pôle du format IERS vers le format Bernese.
- PRETAB: Transformation les orbites précises (format sp1 ou sp3) vers un format tabulaire ".TAB", conversion des orbites IGS du référentiel "Terre fixée" vers le référentiel "inertiel" J2000 et extraction des horloges satellites.
- ORBGEN: Création d'orbite standard ".STD" à partir des orbites tabulaires ou directement à partir des fichiers d'orbites précises.
- RNXSMT: Génère un fichier RINEX ".SMT " à partir de fichier RINEX d'observation. Ce fichier contient les mesures de code lissées par la phase et un marquage des mesures hors-normes et des sauts de cycle. Il utilise les observations sur les deux fréquences.
- SMTBV3: Il lance le programme RXOVB3. Il permet de convertir les fichiers rinex observations et les observations lissé ".SMT" au format Bernese.
- AH_SPP: Calcul d'une trajectoire approchée.
- CODSPP: calcul de l'offset de l'horloge du récepteur.
- GPSEST: Estimation des différents paramètres (trajectoire, ZTDs, décalage d'horloge récepteur, ambigüités)
- AH_CLK: Combinaison et manipulation de l'horloge du fichier rinex. Introduction des paramètres d'horloge récepteur estimées par le premier GPSEST dans les fichiers d'observations.
- gzip.exe : décompression physique des fichiers rinex .
- rnx2crx.exe : décompression Hatanaka.

- teqc.exe : pré-traitement des fichiers d'observation.
- de200.exe : correction des marées terrestres.
- tr_oc.exe : correction des surcharges océaniques.
- kin_geo.pl : passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées géographiques.
- kingmt_e89.pl : passage de l'IGS époque d'observation à l'ETRS89
- clkrcv.pl : extraction des paramètres d'horloge des récepteurs
- bclk_bclkd.pl : calcul de la vitesse de variation des paramètres d'horloge

c) Description détaillée du traitement

L'ensemble des PCFs et les programmes annexes sont lancés par le script "VAPI_kin_ppp.pl". Le noyau de calcul est géré par l'ensemble des instructions décrites dans ce script.

(i) Préparation :

1. Définition des répertoires (de résultats, des programmes, des données)
2. Définition des options de traitements (type du mobile, échantillonnage, tâches supplémentaires à faire). Un PCF par type de mobile. Dans notre cas on va utiliser KIN_PPA avec les options : -s -g -m avion -e 30s ou bien -s -g -m avion -e 5s.
   - -g : Mise à jour des fichiers généraux (BERN50\GPS\GEN)
   - -s : Sauvegarde de la solution (GPSDATA\KIN\SOL...)
   - -e 30s ou bien 5s: Période d'échantillonnage. Pour déterminer quel PCF est appelé (VAPI_RXST5, VAPI_RXST)
   - -m avion: Type du mobile.
3. Nettoyage des sous-répertoires de GPSDATA\KIN\ RAW, OBS et ORB.
4. Ouverture du rapport. Ce rapport décrira le déroulement du traitement et sera fermé à la fin du traitement.

5. Mise à jour des fichiers généraux. Un script perl gère cette tâche "GPSTOOLS\PERL\maj_gen.pl". Il permet de se connecter au serveur ftp pour mettre à jours les fichiers de " BERN50\GPS\GEN".

    - \GEN \PHAS_COD.I05 : Décalage centre de phase/ARP et variations selon l'élévation des satellites.
    - \GEN \PHAS_SGN.I05 : Décalage centre de phase/ARP et variations selon l'élévation des satellites.
    - \GEN \SATELLIT.I05 : Information sur les satellites.
    - GEN \SAT_year.CRX : manœuvre des satellites.
    - \ ORB\P1C1.DCB : décalage d'émission (ou de réception) entre fréquences des signaux GPS.
    - \ GEN\GPSUTC : décalage en seconde entre le temps GPS et le temps UTC

6. Décompression des fichiers : physique avec "GPSTOOLS\COMPR\GZIP.EXE" et Hatanaka avec "GPSTOOLS\COMPR\crx2rnx.exe"

(ii) Analyse des fichiers rinex (programme perl)

- Mise à jour de la table des récepteurs
- Mise à jour de la table des antennes
- Analyse de l'en-tête du fichier rinex
- Type de récepteur : vérification s'il est connu IGS
- Type de l'antenne : vérification s'il est connu IGS
- Position approximative
- Décalage d'antenne
- Ré-ecriture d'un nouveau fichier rinex avec "teqc" avec la période d'échantillonnage déjà choisie.

- Détermination de coordonnées approchées à partir de l'en-tête du fichier rinex. Générer le fichier "BIDON.CRD".

(iii) Orbites et EOP

Le calcul est défini par le PCF "VAPI_KIN_COP0.PCF". Il permet de télécharger les orbites précises et génère des fichiers de paramètres de rotation de la terre et les orbites au format Bernese.

(iv) Lissage du code par la phase.

Le traitement est défini par les PCFs "VAPI_RXST.PCF" et "VAPI_RXST5.PCF" en fonction de l'échantillonnage choisi (5s ou 30s). Le but de ce traitement est de filtrer les résultats en détectant les sauts de cycle, les fautes d'observation et de lisser le code par la phase.

(v) Calcul principal

L'ensemble des tâches est fixé par le PCF "VAPI_KIN_PPP.PCF". A l'issue de cet enchainement de calcul on obtient une estimation de la trajectoire du mobile, les ZTDs, le décalage d'horloge récepteur et les ambigüités.

(vi) Finalisation des résultats

- Extraction des indicateurs de traitement (époques singulières, facteur unitaire de variance et écarts type)
- Mise en forme des résultats et finalisation des rapports
- Passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées géographiques. kin_geo.pl
- Correction des effets de marrés terrestre. de200.exe
- Corrections des effets de surcharge océanique. tr_oc.exe
- Mise en référence dans l'ETRS89. kingmt_e89.pl

Les diagrammes fonctionnels des différents modules décrivant l'enchainement des traitements et l'entrée sortie de chaque programme se trouvent dans l'annexe 4 : Chaîne de calcul (Diagramme fonctionnel des différents modules).

2. Choix des paramètres

Le but de ce stage est de déterminer le délai zénithal total à partir des mesures GPS. Il faut donc bien paramétrer les panneaux du Bernese pour avoir la meilleure estimation possible du ZTD. Les paramètres qui seront étudiés, sont accessible via les panneaux "RNXSMT.INP", "CODSPP.INP" et "GPSEST.INP". Ils se résument en :

- Seuil de filtrage des données : ces paramètres sont situés dans le panneau "RNXSMT.INP". Pour filtrer et lisser les données, les deux fréquences d'observation du code (P1, P2) et de phase (L1, L2). Les observations issues de chaque satellite sont traitées en 4 étapes :

  - Détection des sauts de cycles avec la combinaison linéaire L6 (Melbourne-Wuebbena). Cette combinaison permet d'éliminer l'effet de l'ionosphère, la géométrie, les horloges et la troposphère. La formule de la combinaison est la suivante :

$$L_6 = \frac{1}{f_1 - f_2}(f_1 L_1 - f_2 L_2) - \frac{1}{f_1 + f_2}(f_1 P_1 + f_2 P_2)$$

  - Détermination de la taille du saut de cycle avec la combinaison linéaire L4 (Geometry-free). Les sauts de cycles ne sont pas réparés mais une nouvelle ambigüité est introduite. La formule de la combinaison est la suivante :

$$L_4 = L_1 - L_2$$

  - Suppression des observations hors-norme qui n'étaient pas détectées lors de la première étape. On utilise ici la combinaison linéaire L3 (Ionosphere-free). La formule de la combinaison est la suivante :

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2}(f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2)$$
$$P_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2}(f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2)$$

  - Lissage des observations de code par la phase.

  Le fait de s'intéresser aux paramètres de détection de fautes et élimination des observations hors norme est important quand on fait du PPP en mode

cinématique car la redondance des observations est assurée par le nombre de satellites observés. Si les paramètres d'élimination sont très serrés on risque d'avoir des époques singulières lors de la résolution des équations d'observations par moindre carrés. De plus quand il y a une observation fausse, la solution sur l'époque concernée sera mauvaise. Parce qu'on fait un traitement époque par époque, il n'y a pas autant d'observations pour que la faute soit répartie sur l'ensemble des observations et soit minimisée. Pour cela, il faut bien détecter les fautes et en même temps ne pas éliminer beaucoup d'observations. Dans le panneau "RNXSMT" on va s'intéresser donc à deux paramètres qui sont :

- *RMS of a clean arc for Melbourne-Wuebbena:* pour la détection de saut de cycle. Quand un saut de cycle est détecté et n'est pas corrigé, une nouvelle ambigüité est introduite. De cette façon on corrige la faute mais on ajoute un nouveau paramètre à estimer et on perd de la redondance. ***(1)***

- *RMS of an arc in ionosphere free LC (L3-P3):* Le seuil d'élimination d'observations hors–norme. Le fait d'éliminer un satellite, élimine deux observations une sur le code et une sur la phase. De cette façon on aura moins de redondance. ***(2)***

- Paramètre d'estimations. Ce sont les paramètres qui sont susceptibles d'influencer la solution finale du panneau "GPSEST.INP". Ces paramètres sont :

  - *Elevation cutoff angle:* Les paramètres qui seront estimés sont les coordonnées, le délai troposphérique, le décalage de l'horloge récepteur et les ambigüités. La hauteur au-dessus de l'ellipsoïde, le ZTD et l'offset de l'horloge récepteur sont fortement corrélés quand on les estimes ensemble. Le fait de choisir un angle de coupure très bas diminue la corrélation. En plus la station verra plus de satellites donc plus de redondance et la géométrie des satellites sera meilleure. L'inconvénient est le risque de recevoir des multi-trajets. Ce paramètre existe aussi dans les panneaux CODSPP.INP et AH_SPP.INP. ***(3)***

  - *Gradient estimation model:* pour tenir compte des asymétries azimutales de la réfractivité qui s'amplifie quand l'angle de coupure devient de plus en plus faible***.*** ***(4)*** *Une description du gradient et du modèle utilisé est dans l'annexe2 : modélisation du retard troposphérique (gradients horizontaux)*

- Sigma a priori : On peut aussi contraindre les paramètres à estimer pour diminuer les bruits, lisser la solution et diminuer la corrélation entre les paramètres. On peut donc contraindre les paramètres suivants :

  - *Sigma a priori du ZTD :* contraindre en relatif le ZTD. Le délai zénithal est estimé par intervalles d'une minute. Le fait d'appliquer cette contrainte entre deux époques consécutives limite la variation de la troposphère en fonction du temps. ***(5)***

  - *Sigma a priori du gradient :* contraindre en relative les gradients horizontaux du délai troposphérique. ***(6)***

  - *Sigma a priori des composantes horizontales :* contraindre en absolu par rapport au fichier de coordonnées en entrée.

  - *Sigma a priori de la composante verticale :* contraindre en absolu par rapport au fichier de coordonnées en entrée.

Pour fixer les paramètres des panneaux une série de tests a été effectuée sur la première semaine d'observation à partir des données du GPS installé sur le bateau. On a varié ces paramètres et on a contrôlé la variation des indicateurs statistiques (facteur unitaire de variance, le nombre d'époques singulières) et l'allure de la courbe du délai troposphérique. L'ensemble des tests se résume dans le tableau suivant :

Paramètres	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5
(1)	0.8 (L5 cycle)	0.8 (L5 cycle)	0.8 (L5 cycle)	0.8 (L5 cycle)	0.5 (L5 cycle)
(2)	2 m	2 m	2 m	2m	1.6 m
(3)	5°	5°	5°	3°	3°
(4)	NONE	NONE	NONE	TILTING	TILTING
(5)	0.005 m	0.00005 m	0.001 m	0.001 m	0.001 m
(6)	-	-	-	0.001 m	0.001 m

Tableau 3 ✔ Tests des paramètres

On remarque que dans ce tableau on n'a pas testé l'effet de la variation de la contrainte absolue de la composante verticale sur le ZTD. La raison de ce choix est que l'influence d'un biais sur H est moins importante que l'influence d'un biais sur le ZTD avec un angle de coupure assez bas. Par exemple avec un angle de coupure de 5° : 1mm sur le ZTD engendre un biais de 6.5 mm sur H alors qu'un mm sur H engendre 0.15 mm sur le ZTD. (Exemple du cours S.Nahmani, PPMD-13 mars 2009).

Pour les tests (test1, test2, test3) on a fait varier la valeur de la contrainte relative pour la valeur du ZTD. Cette contrainte se traduit par la différence tolérée des ZTDs entre deux époques consécutives. Le graphe suivant montre la variation de la courbe du délai zénithal total en fonction du temps et de la contrainte relative sur le ZTD.

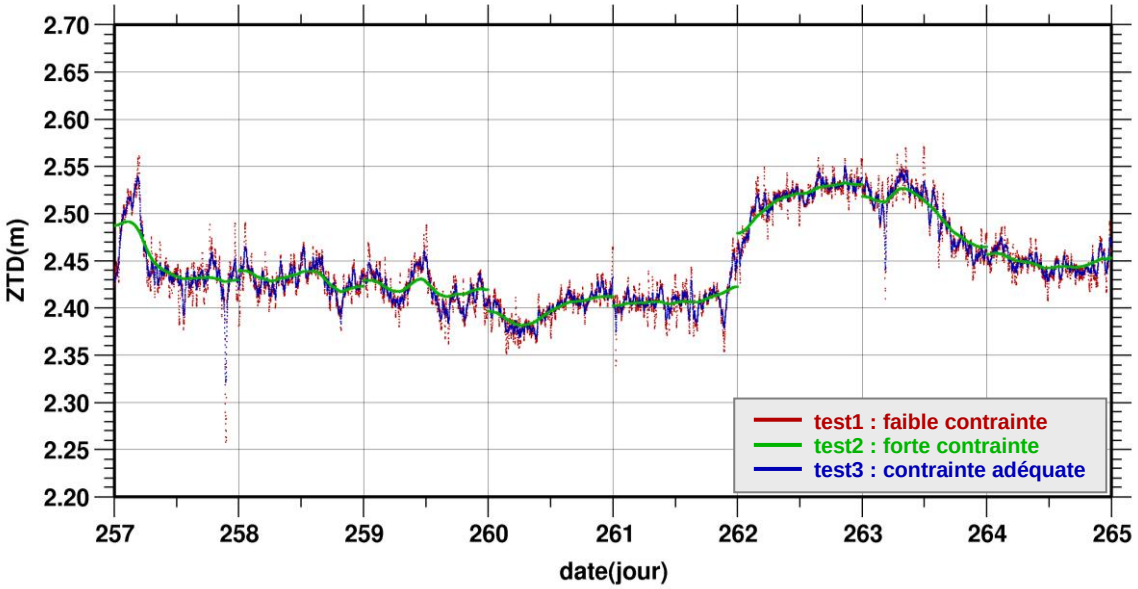


Figure 3 ✔ Variation du ZTD en fonction de la contrainte relative

On remarque que la courbe rouge est très bruitée. La courbe verte est très lissée et présente des sauts entre les jours. La courbe bleue représente un lissage assez cohérent par rapport à la courbe rouge. Pour la courbe bleue on tolère une variation de 1mm du ZTD entre deux époques consécutives. Ce choix est justifié par le fait que le GPS est installé sur une plate forme mobile. Le bateau se déplace à environ une vitesse de 10 m/s. Or les ZTDs sont estimés par intervalle de 1min. Pendant ce temps le bateau a parcouru environ 600m.

⇒ ***Pour le reste des tests on va utiliser cette valeur de contrainte.***

Concernant les tests (test3, test4) on a utilisé un gradient horizontal et on a diminué l'angle de coupure à 3°. Un angle de coupure assez bas permet de diminuer le facteur de corrélation qui existe entre les différents paramètres (ZTD, hauteur ellipsoïdale, horloge récepteur) et d'avoir plus de satellites et une géométrie meilleure. Avec un angle de coupure bas on peut avoir des multi-trajets, mais dans le cas du bateau l'antenne est à environ 30 m au-dessus de la surface de la mer. Donc avec cet angle de coupure les ondes qui se réfléchissent sur la surface de la mer ne risquent pas d'être prises en compte dans les calculs. Avec l'utilisation d'un tel angle de coupure l'asymétrie locale de la troposphère devient plus importante. De ce fait, on utilise les gradients horizontaux pour tenir compte de

l'hétérogénéité de la réfractivité de l'atmosphère L'utilisation du gradient est justifiée par la présence du bateau pendant à peu près 14h au port. Il est sur la côte entre deux milieux différents. Au niveau des équations on ajoute 4 inconnues sur une journée d'observations : un gradient nord-sud et un autre est-ouest au début et deux à la fin. Le graphe suivant montre la variation de la courbe du délai zénithal total en fonction du temps et de l'utilisation du gradient avec un angle de coupure de 3°. Dans la documentation de Bernese, il est conseillé d'utiliser le modèle de TILTING pour le gradient.

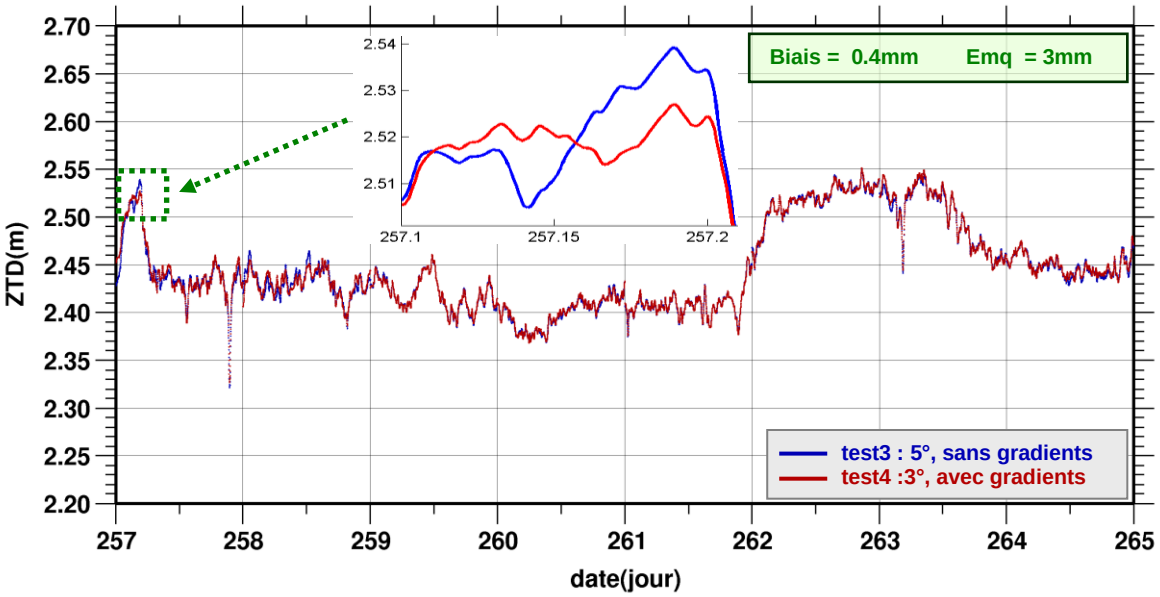


Figure 4 ✔ Variation du ZTD en fonction de l'angle de coupure et l'utilisation des gradients horizontaux

Graphiquement on remarque de faibles différences entre les deux courbes et aux niveaux des indicateurs statistiques ça n'améliore pas beaucoup la solution. En zoomant sur une partie du graphe on remarque qu'il y a des périodes où les deux solutions sont différentes d'environ 2cm. Mais sur l'ensemble des huit jours on a un biais de l'ordre de 0.4mm et un Emq de 3mm. Ces valeurs sont faibles mais on a des variations locales sur un intervalle d'une heure. On ne peut pas dire que l'utilisation des gradients améliore la solution dans ce cas. Suivant les recommandations dans la documentation officielle du logiciel Bernese V5.0, l'utilisation des gradients améliore la solution.

⇒ ***Dans la suite du traitement on utilisera un gradient avec un angle de 3°.***

Le dernier test consiste à voir comment le filtrage des résultats affecte la solution. Dans la comparaison suivante on a serré les paramètres de détection de saut de cycle et des observations hors norme.

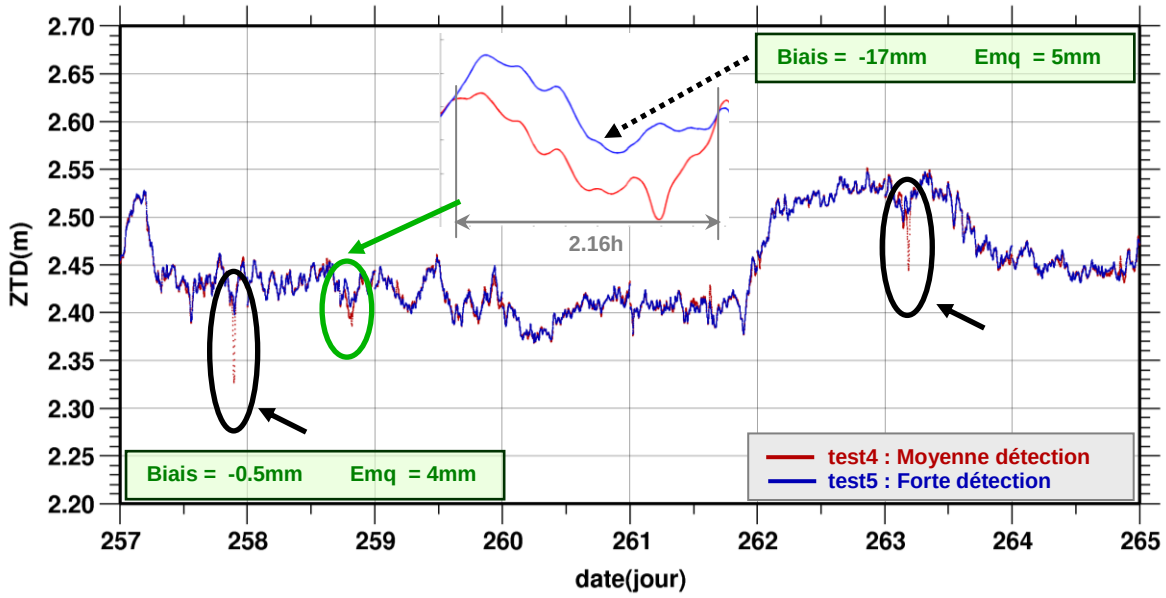


Figure 5 ✔ Variation du ZTD en fonction des paramètres de détection de saut de cycle et observations hors norme

On remarque que les deux pics marqués par les flèches noires ont disparus et que les deux courbes sont très proches. Sur l'ensemble des jours on a un biais moyen de -0.5mm et un Emq de 4mm entre les deux solutions. On peut dire que le dernier test a amélioré les résultats. Mais on remarque que, à l'endroit marqué par la flèche verte, il y a un changement de la forme de la courbe. Les deux solutions sont différentes sur un intervalle d'environ 2h. On remarque un biais de l'ordre de -17mm et Emq de 5mm. Les fichiers de rapport de traitement montrent que le nombre d'époques singulières a augmenté. Le fait de serrer les paramètres de détection des sauts va augmenter le nombre de paramètres à estimer parce qu'on va ajouter de nouvelles ambigüités. Et pour la détection des observations hors norme on va éliminer des satellites du traitement. Comme conséquence on aura juste le nombre nécessaire pour déterminer une solution qui ne sera pas bien déterminée du fait qu'on a moins de redondance parce qu'on a moins d'observables et plus de paramètres à estimer, ou bien moins d'observations que de paramètres à estimer et le système est indéterminé. Il faut donc avoir un compromis entre d'une part avoir suffisamment d'observations et d'autre part détecter le maximum de saut de cycles et d'observations hors norme.

Les pics qui ont disparu ne sont pas prédominant dans le choix des paramètres parce que ces pics peuvent être éliminés par la suite du traitement en faisant du traitement du signal. Ce qui est plus important c'est de ne pas avoir d'époques singulières et que la forme des courbes ne soit pas modifiée.

⇒ ***Enfin les traitements des données du bateau se feront avec les paramètres du test4.***

Les paramètres finaux du traitement sont :

- Modèle a priori Dry_Niell
- Fonction de projection des paramètres troposphériques Wet_Niell
- Angle d'élévation minimum 3°
- Utiliser une contrainte relative pour l'estimation du ZTD de valeur : 1mm.
- Utilisation des gradients horizontaux avec le modèle de TILTING avec une contrainte relative de 1mm.
- Coordonnées en entrée contraintes en absolue à 5cm en planimétrie et à 20 cm en altimétrie.

Remarque :

- Dans le Bernese, il y a beaucoup d'autres paramètres à gérer, mais on a étudié les paramètres qui sont censés affecter directement la valeur du délai troposphérique zénithal.
- Il faut que la station soit marquée par "AIRBORNE" dans le fichier "RGP1DOME.STA". Ce fichier se trouve dans le répertoire STA de GPSDATA. Il décrit les stations du RGP, nom, numéro DOMS, date de fonctionnement, type de récepteur, type d'antenne…. Dans notre cas la station sur le bateau est inconnue, donc on ajoute dans ce fichier la ligne suivante :

STATION NAME	FLG	FROM	TO	MARKER TYPE
**********	***	YYYY MM DD HH MM SS	YYYY MM DD HH MM SS	**********
ZZZZ 99999S999	001	2008 09 01 00 00 00		AIRBORNE

Cette option est importante car sans elle on appliquera une correction de marrée terrestre et de surcharge océanique qui est calculée à partir du premier point et qui sera la même le long du trajet. Or si le bateau a parcouru une grande distance cette valeur sera fausse. Donc le fait d'utiliser cette option empêche d'appliquer ces corrections dans le logiciel Bernese. Donc le résultat obtenu à l'issue de Bernese contient les surcharges et les marrées terrestres. Une fois les coordonnées déterminés, la correction sera calculée point par point et appliqué par la suite. Les modèles de marée terrestre et de surcharge océanique utilisés sont : Tide2000 et fes2004.

3. Validation de la méthode de calcul

a) Comparaison avec des données issues des stations proches du bateau :

Le bateau passe environ 14h stationné au port. L'idée est donc de calculer le délai zénithal troposphérique à l'aide des données des stations du réseau GPS permanent (RGP) les plus proches "MARS", "PRIE", "AJAC" et "AJA2" (une station n'appartenant pas au RGP) et de le comparer avec celui calculé en utilisant les données du GPS installé au bord du bateau. Le calcul se fera de la même façon en utilisant le noyau de calcul PPP et avec les mêmes paramètres déjà utilisés pour le traitement de la campagne VAPPIMED.

La distance entre les stations "MARS", "PRIE" et le port de Marseille est respectivement de l'ordre de 3 km et 4km. La distance entre les stations "AJAC", "AJA2" et le port d'Ajaccio est respectivement de l'ordre de 2 km et 7km. Vue la faible distance entre les stations et les ports on espère donc avoir des courbes de ZTD qui ont la même forme sur les fenêtres de temps de 14h correspondant au stationnement du bateau au port de Marseille et d'Ajaccio. La figure suivante montre le résultat de la comparaison :

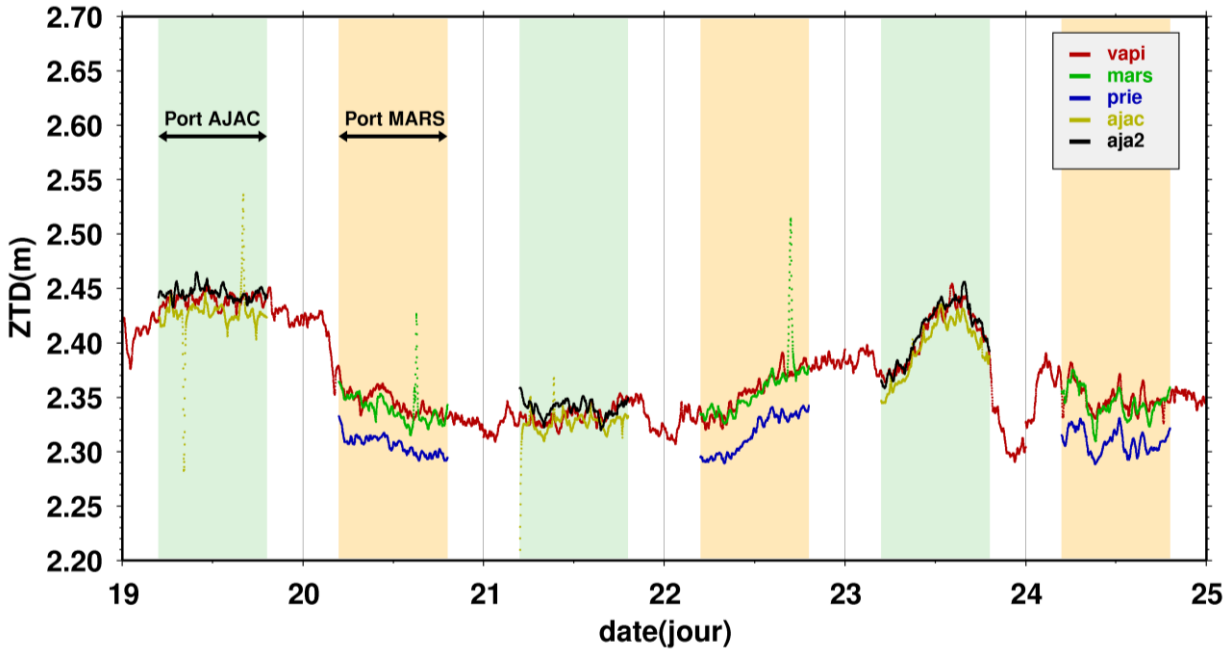


Figure 6 ✔ Comparaison du ZTD avec les stations proches du RGP

On remarque que les courbes des ZTDs des stations ont la même forme que celle issue des données du bateau sur la période correspondant au stationnement de ce dernier

aux ports. Par contre, il y a un biais qui se voit surtout sur la station de "PRIE" et légèrement sur les autres stations. Ce biais est due à la forte dénivelée entre la station de "PRIE" et le port. Ces courbes peuvent être recalées en estimant ce biais. L'écart peut être calculé en supposant qu'il est dû à la partie hydrostatique du ZTD donc la variation de pression entre deux altitudes différentes. On peut utiliser la formule de "Saastamoinen 1972" pour calculer la partie hydrostatique :

$$\Delta l_h^z = 0.0022768 \times P_{sol}[hPa]$$

Deux valeurs de ZHD seront calculées. Une valeur pour un point au niveau du sol avec les conditions de pression standard et une autre valeur au niveau de la station avec la pression déterminée au niveau de celle-ci. De ce fait, il faut calculer la pression au sol pour les stations. Pour cela on peut utiliser un modèle standard d'atmosphère :

$$P = P_0 \left(\frac{T_0 - aH}{T_0} \right)^n$$

Avec

H : L'altitude de la station.

P : Pression à l'altitude H .

P_0 : La pression à l'altitude zéro.

T_0 : La température à l'altitude zéro.

n : Constante sans dimension

a : Gradient de température

Dans ce cas on a pris comme valeurs initiales : $P_0 = 1013.25hPa$, $T_0 = 15° = 288.15k$, $a = 0.0065km^{-1}$, $n = 5.2561$, $H_{MARS} = 12.88m$, $H_{PRIE} = 137.41m$ $H_{AJAC} = 51.04m$, $H_{AJA2} = 25.07m$

On trouve :

$\Delta l_0^z \sim= 2.307m$: Valeur de ZHD pour une valeur de pression au niveau du sol.

$$\Delta l^z_{h,MARS} \sim= 2.303m\,,\ \Delta l^z_{h,AJAC} \sim= 2.293m\,,\ \Delta l^z_{h,AJA2} \sim= 2.3m\,,\ \Delta l^z_{h,PRIE} \sim= 2.269m$$

Enfin, les biais sont calculés par rapport à la valeur de Δl^z_0. Une fois ces écarts appliqués, on obtient les résultats suivants :

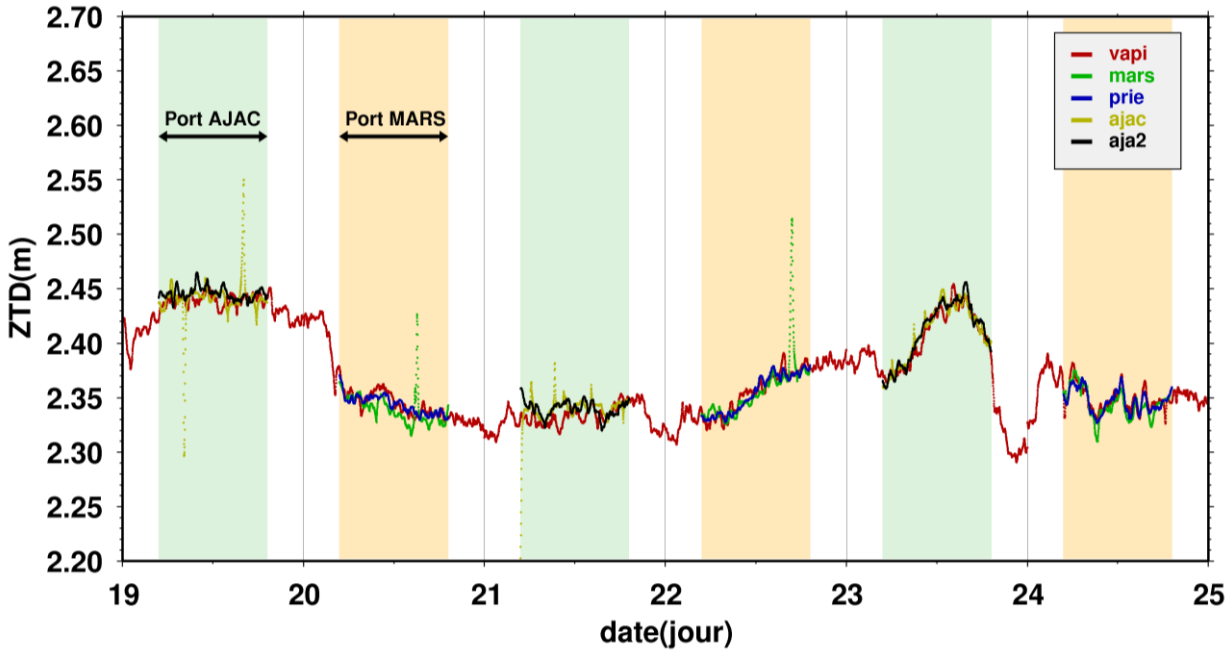


Figure 7 ✔ Comparaison du ZTD ave les stations proches du RGP

Avec ce recalage, les courbes collent bien et ont le même ordre de grandeur. Le tableau suivant résume les écarts entre les ZTDs issus des données du bateau et les ZTDs issu des données des stations proches :

	MARS	PRIE	AJAC	AJA2
Biais (mm)	2.8	1.2	-3	-5.1
Emq (mm)	14.7	6	15.6	8 .3

Tableau 4 ✔ Comparaison des ZTDs bateau avec ZTD issu des données des stations proches

Ces résultats montrent bien que les stations proches subissent le même phénomène du à la propagation de l'onde GPS dans la troposphère. Mais cette validation reste interne par ce qu'on utilise la même méthode de calcul. Il faut donc comparer les résultats issus des méthodes différents de traitement et de centre différents de calcul.

b) Traitement des stations du RGP

Le but de ces tests est de traiter les données issues des stations avec le noyau de calcul et de comparer les coordonnées et les ZTDs estimés en PPP cinématique avec la solution officielle du RGP. Cette comparaison nous donnera une information sur la précision et l'exactitude des résultats et nous fournira une validation externe.

(i) Comparaison des coordonnées des stations avec la solution du RGP

Ce test consiste à calculer les coordonnées des stations "AJAC", "MARS", "PRIE" en PPP en mode cinématique et de les comparer avec la solution officielle du RGP. Le but est de voir comment varie la série temporelle, avoir une idée sur la dispersion du nuage de points et l'exactitude de la solution en la comparant aux coordonnées officielles du RGP qui sont calculées en différentiel en mode statique.

Les résultats suivants sont issus d'un traitement de 5 jours. Une position par époque de 30s a été calculée. Les résultats ont été filtrés par la méthode des 3 sigmas. La comparaison du barycentre du nuage de points par rapport à la solution officielle du RGP nous donne une idée de l'exactitude de la solution. Le tableau suivant résume l'ensemble des résultats :

	MARS	PRIE	AJAC	AJA2
Nombre d'époques initial	14400	14400	14400	14400
Nombre d'époques final	14028	14109	14164	14253
Pourcentage de rejet	2.652	2.063	1.666	1.031
Ecart plani / RGP (m)	0.01	0.009	0.008	----
Ecart alti / RGP (m)	0.003	0.002	-0.015	----
Dispersion de points(m)	0.01	0.009	0.01	0.008
Emq E (m)	0.016	0.014	0.015	0.014
Emq N (m)	0.014	0.013	0.011	0.012
Emq H (m)	0.043	0.036	0.045	0.035

Tableau 5 ✔ Comparaison des coordonnées avec la solution RGP

On remarque que le pourcentage de rejet est faible. On a un biais en planimétrie de l'ordre de 1 cm par rapport à la solution du RGP et 1.5cm en altimétrie. La dispersion du nuage de points à 1sigma et de l'ordre de 1 cm. Concernant la série temporelle la dispersion des points est de l'ordre de 1.5cm sur la composante EST et NORD et 4.5cm sur la composante VERTICALE. On peut donc conclure que les résultats sont précis pour tel type

de positionnement : PPP en mode cinématique. La comparaison avec la solution RGP représente une validation externe de la solution.

Le graphe suivant nous donne la forme du nuage de point pour la station AJA2.

Les graphes des stations MARS, AJAC et PRIE sont en annexe 4 : Chaîne de calcul (coordonnées des stations).

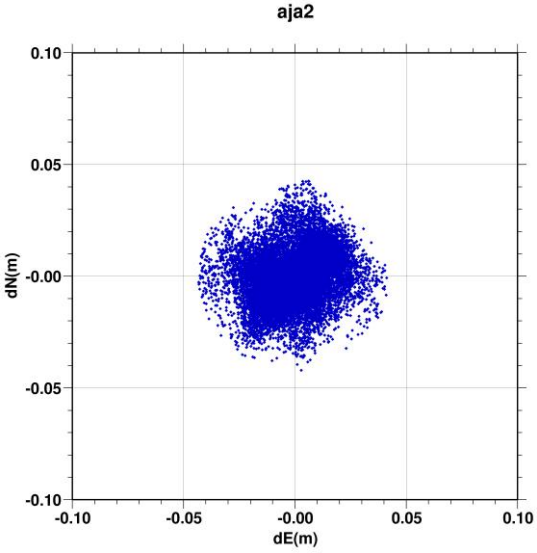


Figure 8 ✔ Dispersion du nuage de point d'une solution PPP

Le graphe suivant nous donne la forme des séries temporelles :

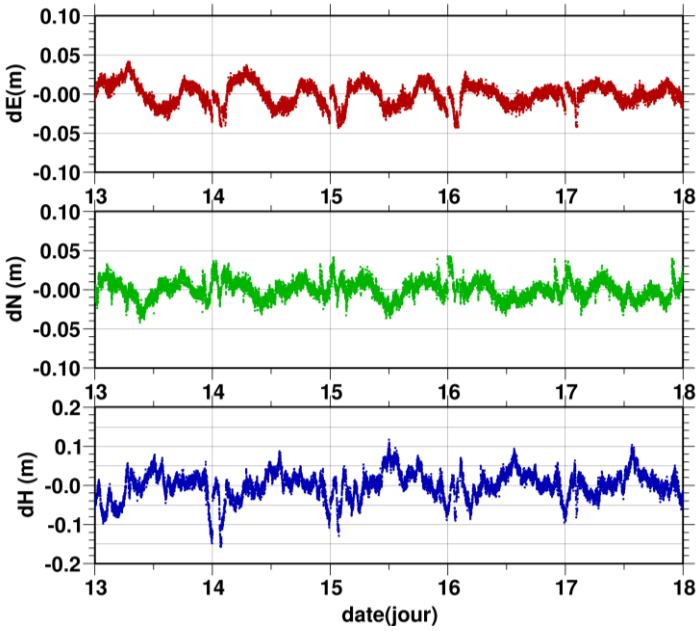


Figure 9 ✔ Série temporelle de la solution PPP

On remarque qu'il y a un signal périodique résiduel et un saut au début de chaque journée. Le saut peut être expliqué par la non fixation des ambigüités à des valeurs entières et que le calcul d'une journée à l'autre se fait de manière indépendante. Le signal périodique résiduel vient du fait que le modèle de marée et de surcharge utilisée est un modèle global. Il peut avoir des phénomènes physiques locaux qui ne sont pas pris en compte.

Les graphes suivants montrent les effets de marée sur les coordonnées :

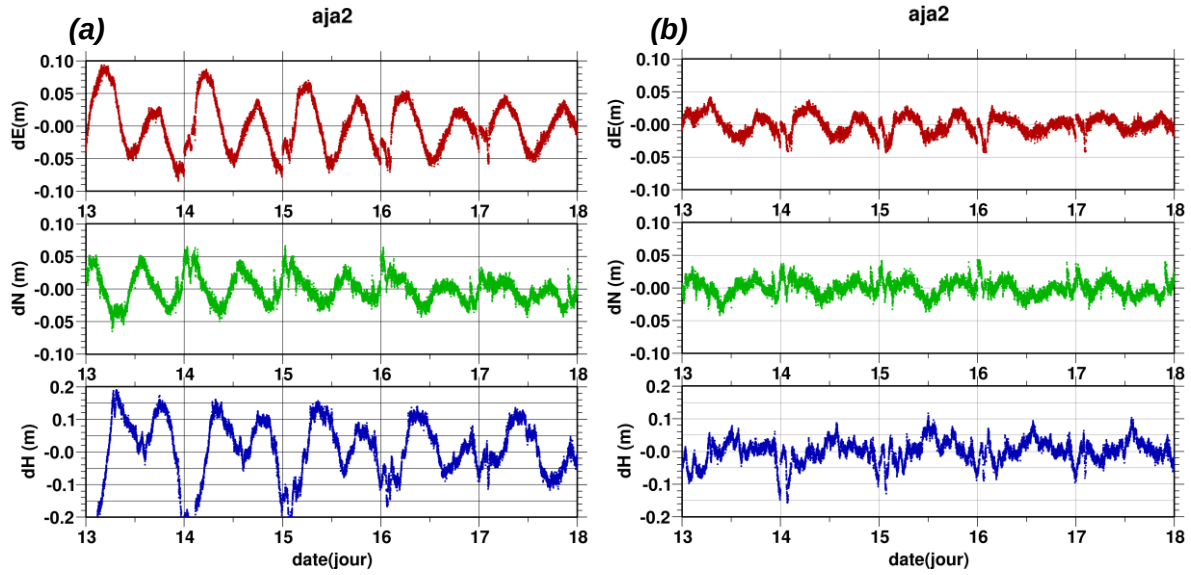


Figure 10 ✔ Effet des marées terrestres sur les séries temporelles

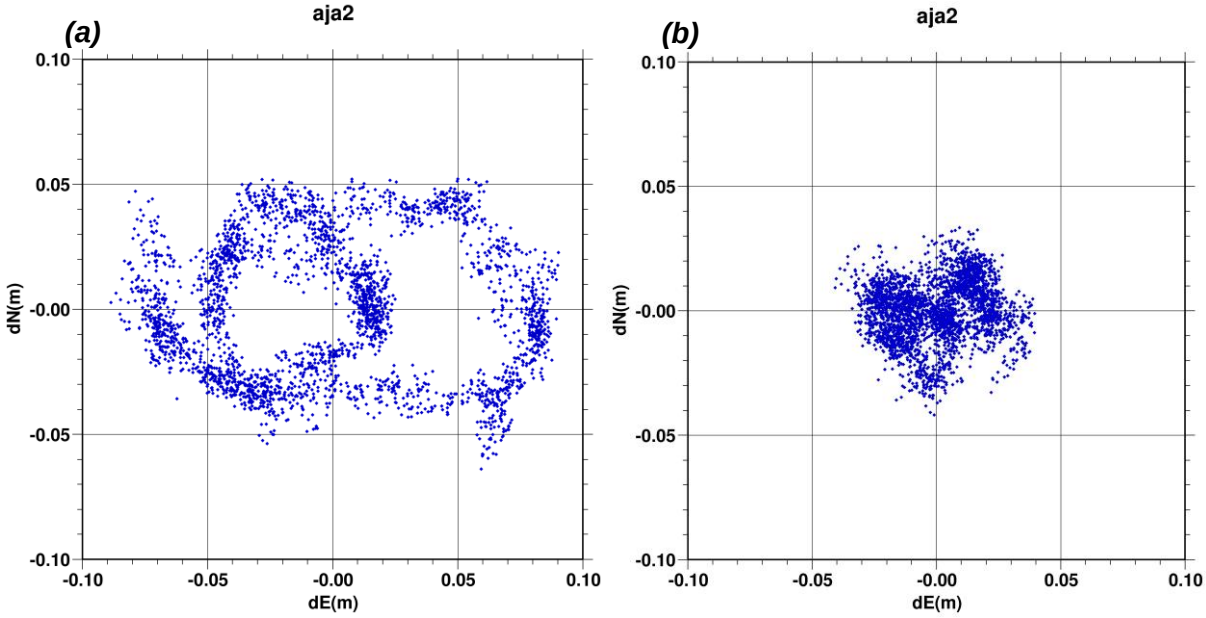


Figure 11 ✔ Déplacement d'une station sous l'effet des marées terrestres

Les figures 10 et 11 montrent l'effet des marées sur une station. La figure 10a représente la série temporelle de la station "AJA2" avant application de la marée et la figure 10b après avoir appliqué les marées. On remarque que l'amplitude du signal a diminué mais qu'il reste encore un signal résiduel. La figure 11a montre comment se déplace une station pendant une journée sous l'effet des marées. La figure 11b montre la forme du nuage de points une fois les marées sont enlevées. En résumé ces graphes montrent que le résultat dépend du modèle de marée et la capacité de ce dernier à bien décrire le phénomène. Et plus généralement de la façon utilisée pour éliminer les différents postes d'erreur. En différentiel on ne verra pas ce phénomène résiduel par ce qu'il sera minimisé du fait que deux stations proches vont subir les mêmes effets.

(ii) Comparaison des ZTDs issus de la solution journalière du RGP et avec ceux issus du noyau de calcul

Dans le test précédent on a comparé les coordonnées issues du PPP avec ceux de la solution RGP. Dans ce test on va comparer les ZTDs des stations de "MARS", "PRIE" et "AJAC" calculés en utilisant le PPP cinématique avec la solution journalière du RGP qui est conforme au programme de recherche européen EGVAP.

La solution RGP est calculée avec le logiciel Bernese en mode différentiel statique et en utilisant les paramètres suivants :

- Coordonnées fixées.
- Modèle a priori Dry_Niell.
- Fonction de projection des paramètres troposphérique Wet_Niell
- Angle d'élévation minimum : 10°

La méthode de calcul est différente du PPP. Donc ce test représente une validation externe des résultats.

Le graphe suivant représente le résultat des ZTDs sur une période de 26 jours issue de la station de PRIE. La solution RGP est calculé toutes les 15mn et la solution PPP toute les 1mn. Donc on a échantillonné la solution PPP.

Les graphes des stations MARS et AJAC sont en annexe 4 : Chaîne de calcul (Comparaison des ZTDs calculés à l'aide du noyau de calcul avec la solution RGP).

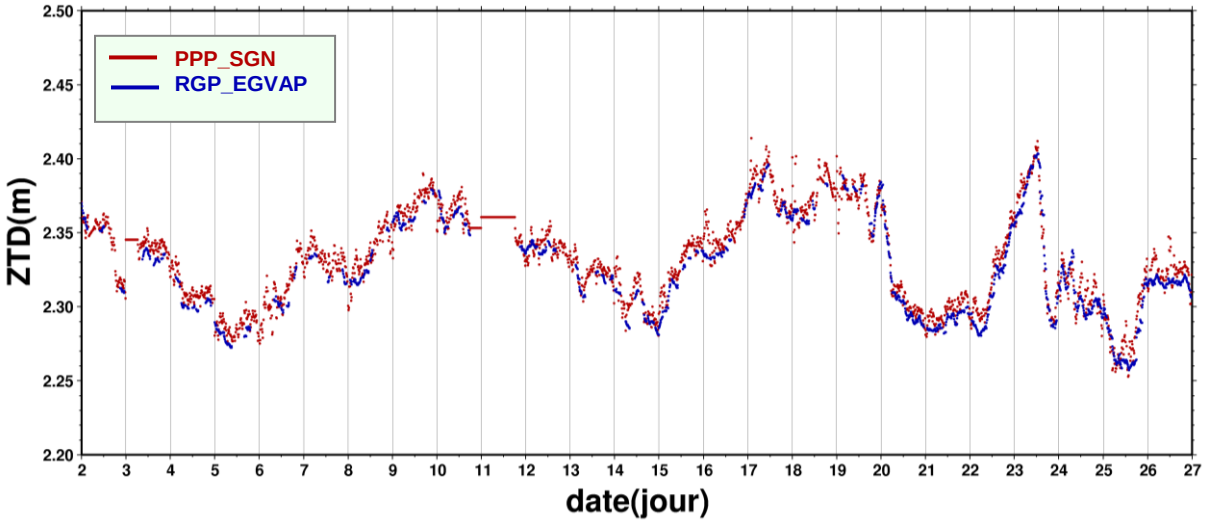


Figure 12 ✔ Comparaison du ZTD issu du noyau de calcul avec la solution journalière du RGP_EGVAP pour la station de PRIE

On remarque que la solution du RGP est plus lissée que les résultats du noyau de calcul. Les deux courbes ont la même forme et leur écart n'excède pas le cm.

Le tableau suivant résume les biais et les écarts types entre les deux calculs pour les trois stations :

	MARS	PRIE	AJAC
Biais (mm)	-2	-5	5
Emq (mm)	13	8	16

Tableau 6 ✔ Comparaison ZTDs avec la solution RGP

Les écarts sont faibles ce qui montre que le traitement PPP et aussi précis que le traitement fait au RGP.

Cette comparaison permet de faire une validation externe des résultats. Les coordonnées et les ZTDs issus du noyau de calcul sont précis par rapport à la solution RGP. Ce qui permet de valider le traitement effectué et les paramètres choisis pour traiter la campagne.

c) Comparaison avec d'autres centres de calcul

Plusieurs centres de calcul sur internet proposent des services de calcul GPS en ligne en mode PPP cinématique. Le but de cette comparaison est de voir la différence de résultats entre la chaîne de calcul et des différents outils de calcul en ligne qui utilisent la

même méthode de positionnement (PPP cinématique). Pour cela on va faire une comparaison avec deux sites :

- CSRS_PPP by natural Resources canada (NRCan) : Ce site nous permet de choisir le type de traitement (statique ou cinématique) et le système de référence. Tous les autres paramètres sont définis par défaut. Il utilise les produits de l'IGS pour faire les traitements (les orbites précises, les horloges des satellites estimées toutes les 5mn). La méthode utilisée pour estimer les différents paramètres est le filtrage de Kalman.

- GAPS : GPS analysis and Positionning Software by Rodrigo Leonardo (University of New Brunswick) : ce site donne plus de possibilités pour modifier les paramètres : coordonnées a priori, type de positionnement, angle de coupure. La méthode utilisée pour estimer les différents paramètres est le filtrage de Kalman.

Concernant la comparaison on a comparé le délai zénithal issu des trois méthodes de calcul et les écarts des séries temporelles des deux sites par rapport à la solution PPP du SGN. Une semaine de données issues du GPS embarqué sur le bateau a été traitée par les trois noyaux de calculs.

(i) Délai zénithal total :

Le graphe suivant montre les courbes de délai zénithal des trois noyaux de calculs :

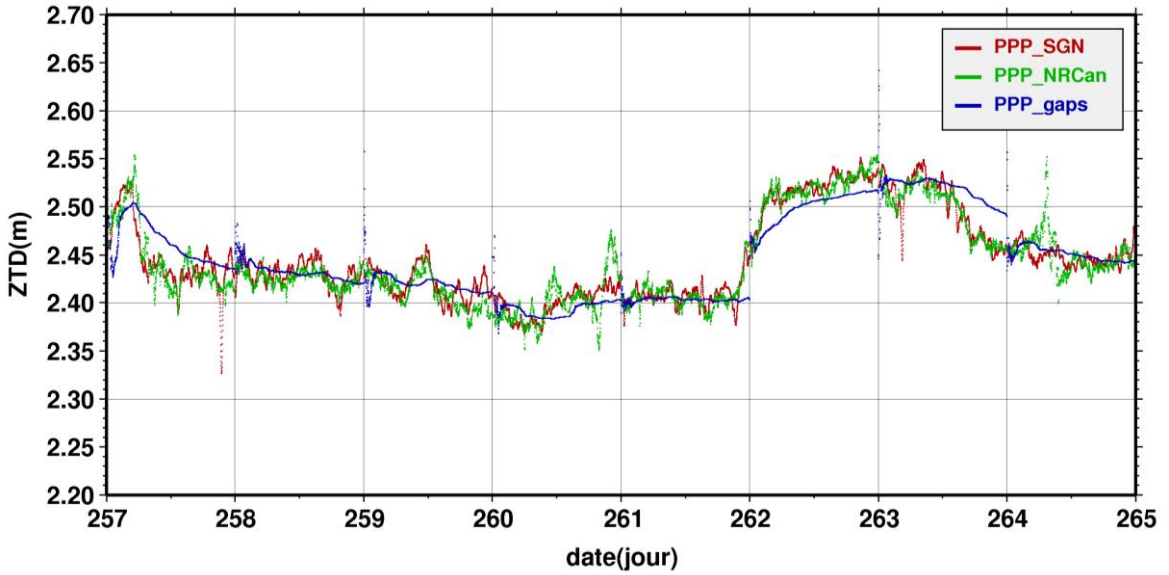


Figure 13 ✔ Comparaison du ZTD issu du noyau de calcul d'autres centres de calcul en PPP

On remarque que les trois courbes ont la même allure et la même tendance. Les résultats du site GAPS sont très lissés par rapport au deux autres calculs. Cela est dû au fait qu'ils appliquent une contrainte forte sur le délai zénithal. On remarque aussi qu'au début de chaque jour leurs solutions présentent des pics. Ces pics s'expliquent par l'utilisation du filtrage du Kalman. La solution au départ est mauvaise et converge par la suite (peut-être qu'ils n'utilisent pas la méthode de rétro substitution). Les résultats du site NRCan collent mieux à la solution SGN. Par contre, leur solution présente des anomalies sur les jours 257, 260 et 264.

(ii) Hauteur au dessus de l'ellipsoïde :

Le graphe suivant montre la variation de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde en fonction des jours.

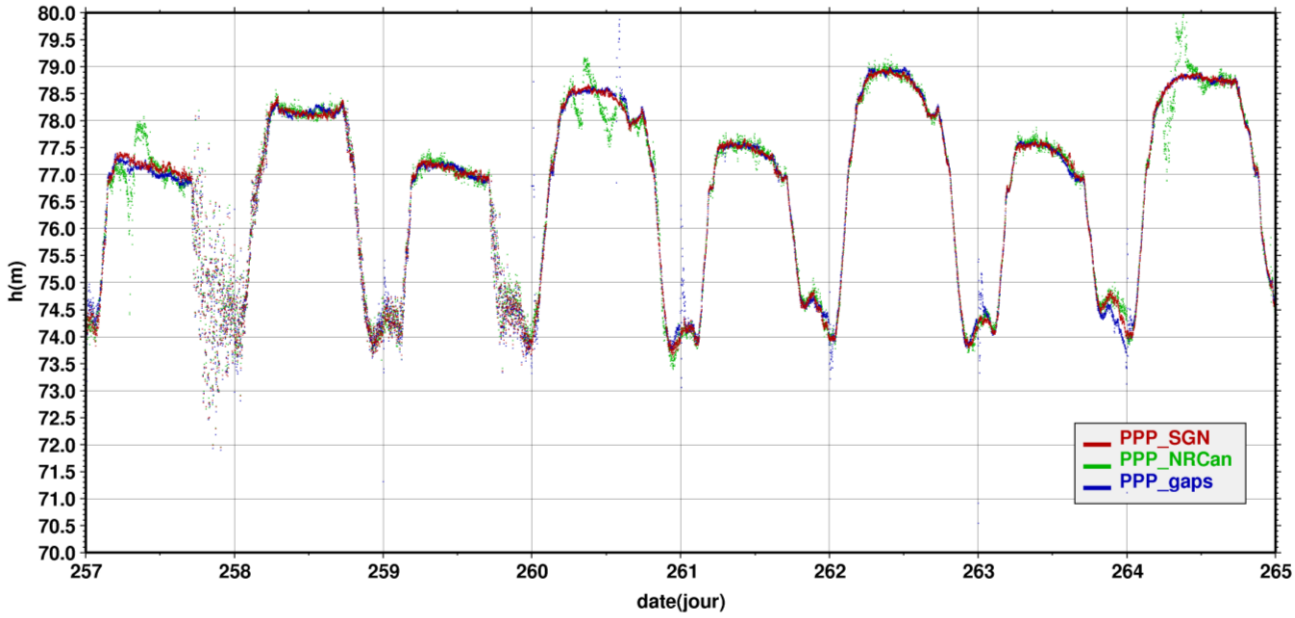


Figure 14 ✔ Comparaison de la hauteur ellipsoïdale issue du noyau de calcul d'autres centres de calcul en PPP

On remarque que les trois courbes évoluent de la même façon. La courbe verte représente les mêmes anomalies que pour le délai zénithal. Le bateau est stationné au port. Donc ce n'est pas normal que la surface de la mer fasse des sauts de cette façon. Donc sur les jours 257, 260 et 264 la solution NRCan est à éliminer. On retrouve aussi les mêmes anomalies au début de chaque jour pour la solution GAPS. Il y a aussi des écarts sur certaines périodes. Mais la solution SGN colle à au moins l'un des deux solutions.

(iii) Séries temporelles

Dans ce test on va comparer les séries temporelles de différentes solutions NRCan, GAPS et SGN deux à deux. On a donc calculé les écarts entre les différentes composantes et les a rapporté sur le graphe suivant :

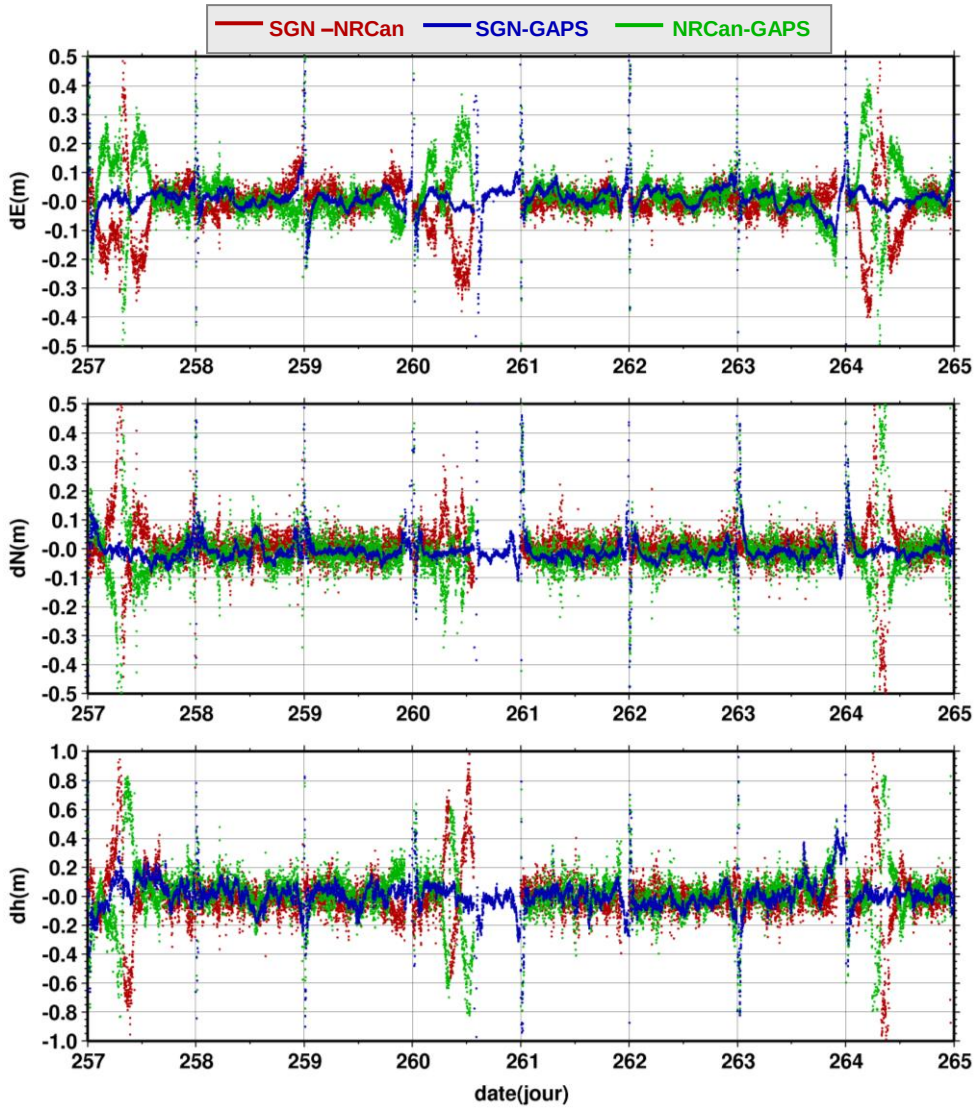


Figure 15 ✔ Ecart des séries temporelles issues du noyau de calcul et ceux d'autres centres de calcul en PPP

On remarque bien que la solution livrée par les sites de calculs présente plusieurs anomalies. La solution NRCan n'est pas du tout bonne trois jours sur huit. Et la solution GAPS présente des grands écarts au début de chaque journée. On remarque que la solution GAPS est plus proche que la solution NRCan de la solution SGN.

Le tableau suivant résume les biais de chaque composante ainsi que les écarts types pour les deux solutions NRCan et GAPS par rapport à la solution SGN :

	SGN-NRCan		SGN-GAPS		NRCan -GAPS	
	Biais	Emq	Biais	Emq	Biais	Emq
dE (m)	-0.014	0.087	0.013	0.073	0.024	0.108
dN (m)	0.007	0.101	-0.009	0.082	-0017	0.122
dH (m)	-0.003	0.204	-0.002	0.206	0.013	0.178

Tableau 7 ✔ Comparaison entre la solution SGN, NRCan et GAPS

La comparaison avec ces sites de calcul montre la cohérence des résultats. Elle montre aussi que la solution PPP est meilleure que la solution proposée par les sites de calcul.

En conclusion, la comparaison des résultats avec la solution journalières du RGP montre que la solution PPP SGN est précise et permets de valider les paramètres choisis pour traiter la campagne.

Une fois qu'on a validé les paramètres de traitement et la méthode il faut développer une interface permettant de traiter l'ensemble de la campagne de façon automatique.

4. Automatisation des calculs

a) Description :

Vu le nombre de jours à traiter et les tests à faire, il fallait développer une interface permettant de faciliter le traitement de la campagne et l'analyse les résultats. Cette interface permet de :

- Calculer la trajectoire d'un mobile en faisant du positionnement ponctuel précis en mode cinématique.
- Lancer le calcul de plusieurs fichiers rinex.
- Analyser les résultats de traitement.
- Avoir des sorties graphiques de différents résultats (trajectoire, hauteur au-dessus de l'ellipsoïde et du délai zénithal) sur plusieurs jours.
- Générer des rapports de calcul. Le rapport de calcul contient des informations sur la station, la qualité de l'estimation, le système de référence. En plus des graphes

représentant le trajet du bateau, la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde, le délai zénithal total, l'erreur d'horloge récepteur, la trace des satellites au-dessus de la station et les ambigüités.

Le graphe suivant montre la fenêtre principale de l'interface ainsi que certaines fenêtres secondaires :

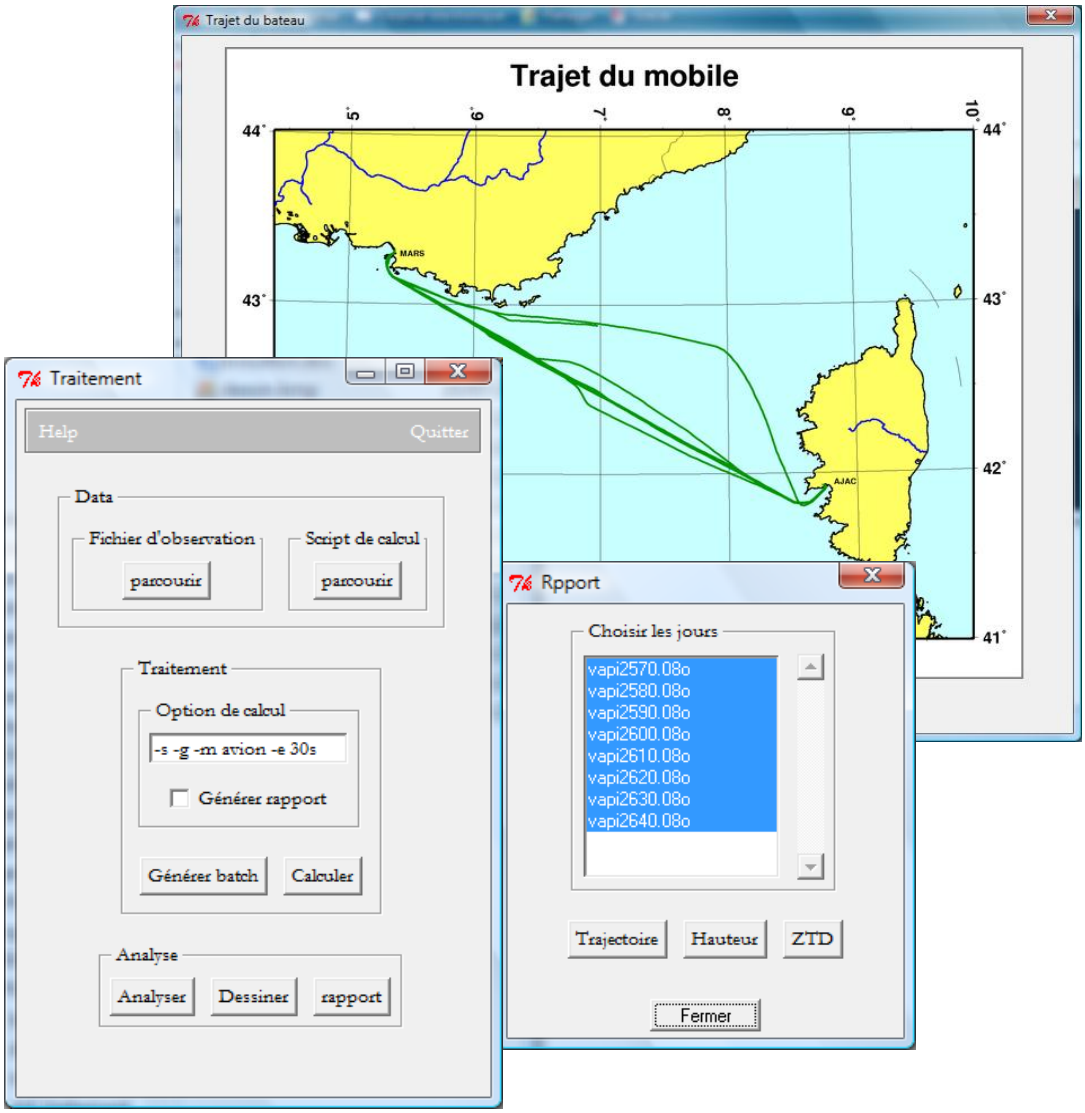


Figure 16 ✔ Interface de traitement

Pour lancer les calculs, il faut:

- Choisir le ou les fichiers rinex à traiter.
- Le programme perl permettant de lancer les scripts de bernese via les PCFs (VAPI_kin_ppp.pl : noyau de calcul modifié).

- Par la suite on choisit les options de calcul.

- Choisir si on veut générer un rapport en fin de chaque calcul. Cette option va augmenter le temps de traitement. Donc il y a aussi la possibilité de générer le rapport par la suite (au moment de l'affichage du rapport).

- On génère un batch. Ce batch contient le nom des programmes à lancer ligne par ligne et les paramètres d'entrées. Il est appelé lorsqu'on lance les calculs via le bouton "calculer".

- Une fois le calcul terminé, on peut analyser les résultats de façon rapide en cliquant sur "analyser". Cette fonctionnalité permet d'extraire les paramètres importants des différents fichiers de rapport sommaire et de les regrouper dans une page "indicateurs.html".

- Le bouton dessiner nous permet de choisir quel résultat on veut visualiser et sur quelle période via une nouvelle fenêtre.

- Le bouton rapport permet d'afficher le fichier de rapport détaillé d'un calcul ou bien de le générer et de l'afficher s'il n'était pas créé auparavant

Les options de calcul sont :

- -g : Mise à jour des fichiers généraux (BERN50/GPS/GEN)

- -o : ORBITES ACQUISES (disponibles dans ORB)

- -s : SAUVEGARDER (REPERTOIRE SOL/...)

- -e [5 30]s: ECHANTILLONNAGE DE TRAITEMENT

- -m [avion]s: MOBILE

Exemple : -s -g -m avion -e 30s

En plus de ces options l'utilisateur peut choisir de générer le rapport juste après le calcul ou bien ultérieurement

Pour faciliter l'utilisation de l'interface un menu d'aide a été programmé décrivant les fonctionnalités de l'interface, méthode d'utilisation et les différentes options de traitement accessibles via la barre de menu.

b) Bibliothèques utilisées

Pour développer l'interface, j'ai utilisé le langage perl. Ce programme fait appel à plusieurs bibliothèques gratuites:

- Tk : C'est une bibliothèque graphique multi-plateforme créée, à l'origine, pour la création d'interface pour les scripts en langage Tcl et est de plus en plus utilisée avec divers langages dont Perl.

- GMT : C'est une bibliothèque open source qui contient un grand nombre de fonctionnalité permettant de manipuler les données géographiques, cartésiennes (filtrage des données, tendance, projection…) afin de générer des graphes sous format post script.GMT supporte une trentaine de projections et de transformations. Elle contient aussi des fichiers de données comme les frontières politiques, les rivières…

  Cette bibliothèque m'a permis de générer des graphes sous format PostScript. Les fonctionnalités de cette bibliothèque sont appelées en ligne de commande via le script perl.

- Image-magick : c'est une suite d'outils pour créer, éditer et composer des images. Elle permet de lire, de convertir et d'écrire des images dans plusieurs formats : gif, jpeg, tiff, post-script …. Cette bibliothèque permet aussi de modifier l'image : couleurs, appliquer des effets, dessiner du texte…. Ces fonctionnalités peuvent être appelées en ligne de commande à partir de script via le système.

  Cette bibliothèque m'a permis de convertir les fichiers ".ps" au format ".png".

Pour pouvoir utiliser l'interface, il faut installer Perl, GMT, Ghost View et Image-magick. Un manuel programmeur a été développé en HTML, CSS et Javascript pour permettre à l'utilisateur de modifier le code et d'ajouter d'autres fonctionnalités. *Le code source et le manuel programmeur se trouvent dans le CD.*

Maintenant il ne reste plus qu'à traiter la campagne VAPIMED.

VI.RESULTATS

Une fois les paramètres fixés et la méthode validée, la campagne a été traitée en faisant un traitement à 30s et un autre à 5s pour voir l'influence sur l'estimation du ZTD et les coordonnées.

Les résultats de traitement à 30s ont été livrés au commanditaire du projet au laboratoire Géoscience Montpellier. Une comparaison a été faite par Karen Boniface dans sa thèse de ces résultats avec un traitement issu du logiciel RTNet(Real Time NETwork processing engine) pour la totalité de la campagne. Les résultats sont très proches. D'un point de vue statistique, les écarts RTNet-IGN donnent un RMS de 13.8mm, un biais de 3mm et un coefficient de corrélation de 96% sur la totalité de la campagne.

1. Traitement à 30s

Le traitement de la campagne nous a permis de déterminer la trajectoire du bateau, la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde et le délai zénithal total.

a) Trajectoire

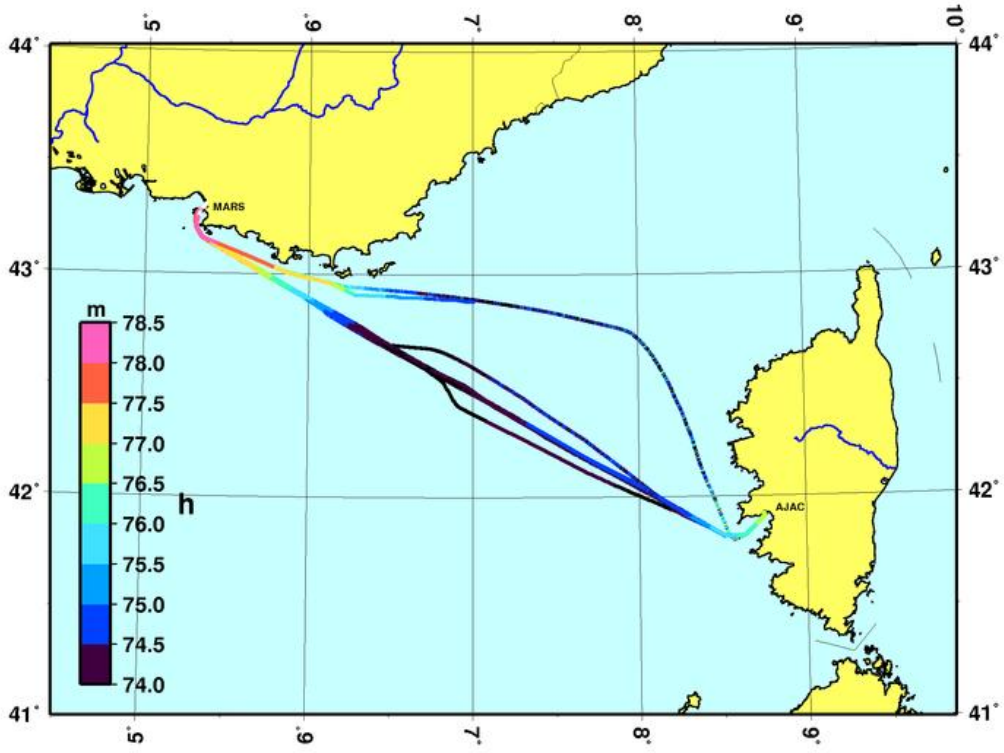


Figure 17 ✔ Trajet du bateau

Ce graphe montre le trajet suivi par le bateau ainsi que la variation de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde le long du chemin suivi. Suivant le code couleur on remarque un creux entre la Corse et la France continentale. Cette variation est visible lorsqu'on trace la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde en fonction du temps.

b) Hauteur au dessus de l'ellipsoïde

Le graphe suivant représente la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde le long du trajet du bateau :

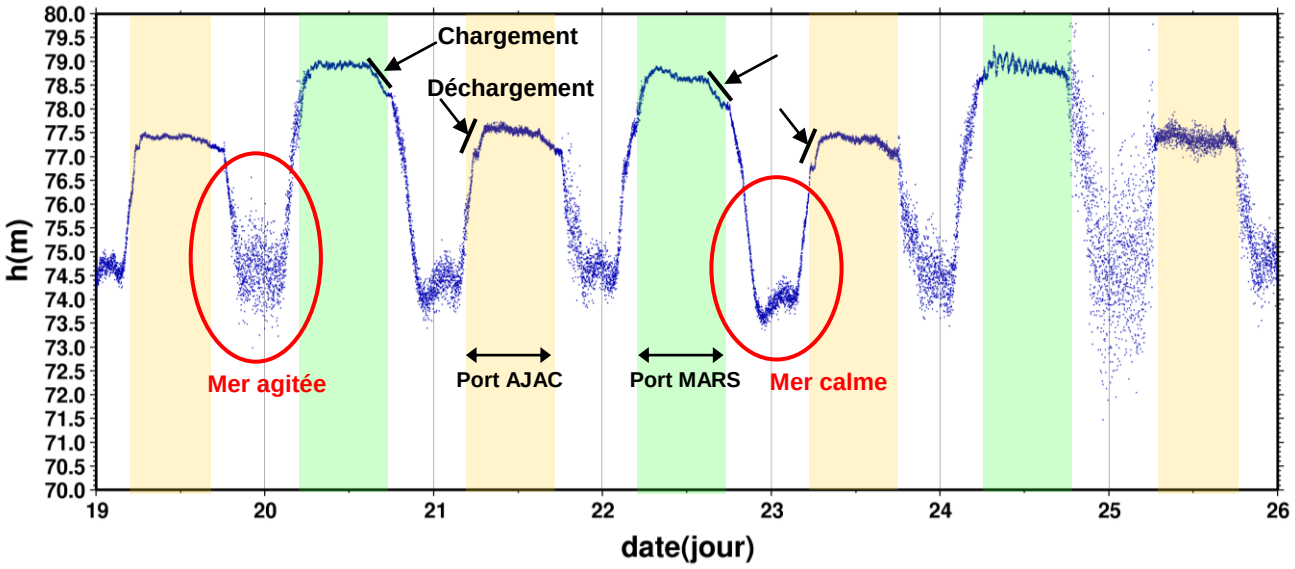


Figure 18 ✔ Hauteur au-dessus de l'ellipsoïde le long du trajet du bateau

A partir du graphe ci-dessus on peut avoir une idée sur la forme du géoïde le long du trajet. Les bandes blanches correspondent aux intervalles de temps durant lesquelles le bateau se déplace. Comme le mobile est en mouvement sur la surface de la mer la variation de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde est reliée directement à la variation du géoïde. On peut voir qu'il y a un creux de géoïde entre la corse et Marseille et une légère bosse a mi-chemin. La forme ne se reproduit pas de la même façon parce que le bateau ne suit pas toujours le même trajet. Par la suite, on montrera une approche qui exploite ces données pour produire une surface proche de la surface du géoïde.

On peut aussi établir d'autres interprétations à partir de ce graphe telles que :

- On peut voir l'état de la mer. Quand il y a de la houle on remarque une forte variation de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde comme désigné sur le graphe. Par contre quand la mer est calme il y a moins de bruit dans les mesures.

- Quand le bateau arrive au port, il est déchargé et quand il repart il est chargé. Ces actions de chargement et déchargement peuvent être remarquées sur le graphe : quand on charge le bateau, il va s'enfoncer donc h va diminuer et à l'inverse.

  On peut avoir un ordre de grandeur de ces variations en utilisant le principe d'Archimède et en assimilant le bateau à un parallélépipède on peut calculer la hauteur immergé à l'aide de la formule suivante :

$$H = \frac{m}{l \times L \times \rho}$$

Avec

$m = 29718 tonnes$: Masse du bateau

$L = 164m$: Longueur du bateau

$l = 27.3m$: Largeur du bateau

ρ : Masse volumique de l'eau

On retrouve la valeur du tirant d'eau : 6.63m.

Suivant les caractéristiques du bateau, on peut charger 544 passagers, 120 voitures, 2300 m linéaire de fret. Un container chargé pèse environ 10 tonne et a une longueur de 12m. Si on estime toute cette charge : 2270 tonnes. Le bateau est propulsé par 4 moteurs de type WARTSILA. Un moteur de ce type consomme 6tonne/h de diesel. Le ferry a 4 moteurs et fait la traversée en 10h environ. Il a donc besoin de 240 tonnes de carburant. En modifiant la masse de bateau on trouve une nouvelle hauteur immergé de l'ordre de 7.19m. Donc un ordre de grandeur de variation de la hauteur au dessus de l'ellipsoïde au chargement et déchargement de l'ordre de 50 cm. C'est ce qu'on remarque sur le graphe.

c) Délai zénithal total

Le délai zénithal a été estimé par époque d'une minute. Le graphe suivant nous montre la forme de la courbe du délai zénithal total :

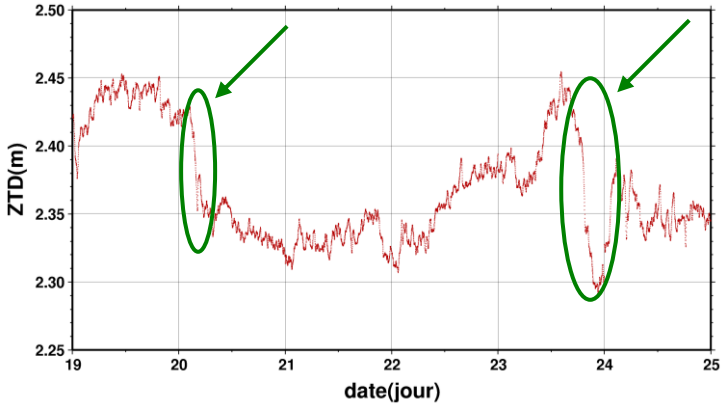


Figure 19 ✔ Délai zénithal total

La valeur du délai zénithal total est importante pour les gens de la météo car ces valeurs permettent d'améliorer les modèles de prédiction surtout pour prévoir les précipitations. Généralement quand il y a des fortes pentes dans la courbe de délai zénithal, il est probable qu'il va pleuvoir les jours qui suivent. On représente sur le graphe les fortes pentes de délai zénithal (jour 20 et jour 24). On remarque sur le graphe de la figure 18 que sur les jours 21 ; 22 et 25 la mer était bien agitée et on avait de la houle. Avec les résultats de pluviométrie, on pourrait confirmer ces résultats. Le graphe suivant montre un exemple d'étude qui met en évidence le fait que quand il y a de fortes pentes dans les ZTD la pluie est très probable les jours suivants.

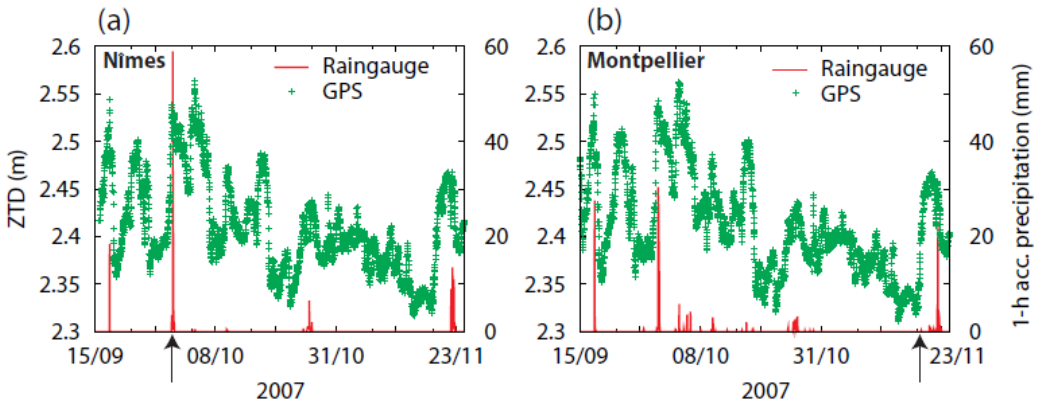


Figure 20 ✔ ZTD et précipitation

Extrait de l'article de K. Boniface et al. High-resolution GPS zenith delay assimilation

La valeur du ZTD peut être décomposée en partie hydrostatique et partie humide. A partir de cette dernière on peut extraire la quantité de vapeur d'eau.

On dispose des valeurs de pression pour le bateau. On peut donc utiliser la formule de "Saastamoinen 1972" pour calculer la composante hydrostatique :

$$\Delta l_h^z = 0.0022768 \times P_{sol}[hPa]$$

Le graphe suivant représente le délai Hydrostatique zénithal.

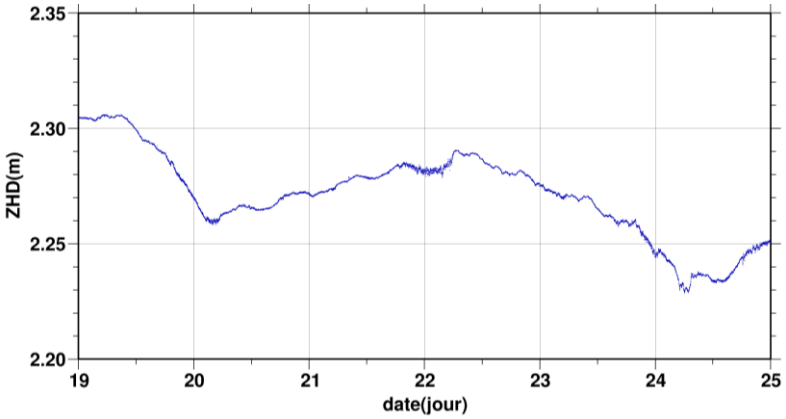


Figure 21 ✔ Composante hydrostatique du ZTD

On remarque que le ZHD varie peu. Sa variation est de l'ordre de 8cm.

A partir du moment où on a le délai total et le délai hydrostatique on peut déterminer le délai humide de la façon suivante :

$$\Delta l^Z = \Delta l_H^Z + \Delta l_W^Z \text{ donc } \Delta l_W^Z = \Delta l^Z - \Delta l_H^Z$$

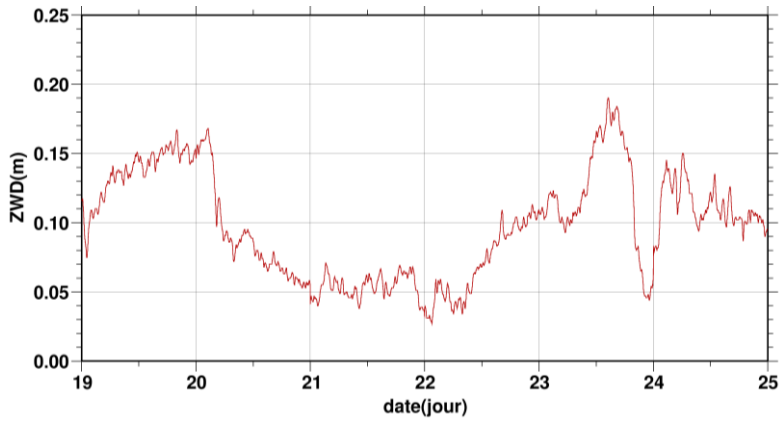


Figure 22 ✔ Composante humide du ZTD

On remarque que la partie humide du délai zénithal varie beaucoup par rapport à la composante hydrostatique. Sa variation est de l'ordre de 20cm. A partir de ces valeurs on peut déterminer quantité de la vapeur d'eau qui est proportionnel à ZWD. Le facteur de proportionnalité est fonction de la température moyenne du profil vertical. Ce facteur est estimé à une valeur de 6.5.

La quantité de vapeur d'eau est déduite du ZWD via une formule approximative :

$$C = \frac{\Delta l_W^Z}{6.5}$$

Ce qui intéresse les gens de la météo est donc cette valeur de la quantité de vapeur d'eau qui est utilisée dans les modèles numériques de prédiction de précipitation. De plus, la forme de la courbe du délai zénithal total : dans la plupart des cas si la courbe des ZTDs présente de forte pente la pluie est très probable les jours suivants.

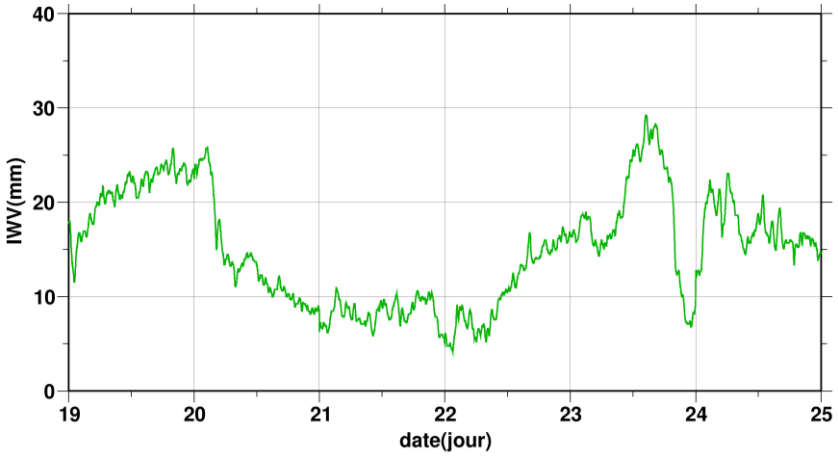


Figure 23 ✔ Quantité de vapeur d'eau

2. Comparaison entre traitements à 30 s et à 5s

Le but de ce test est de voir l'influence de la variation de l'époque de traitement sur les coordonnées et les ZTDs.

a) Comparaison des ZTDs

Le graphe suivant montre la variation de la valeur du ZTD en fonction du temps pour deux traitements différents :

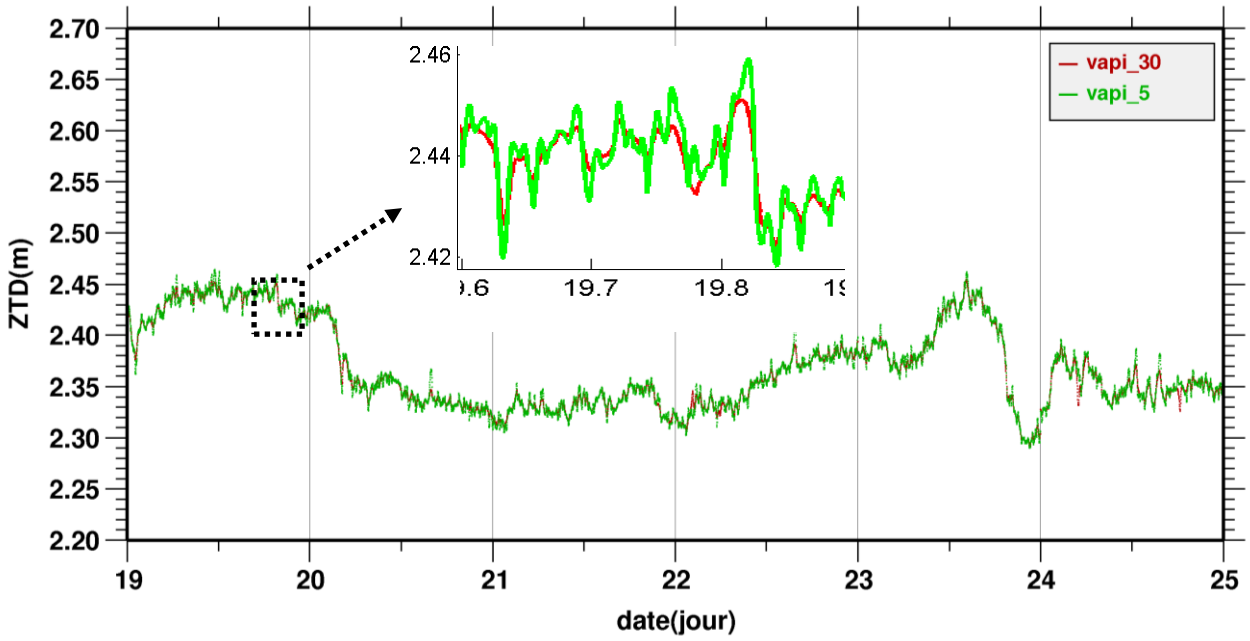


Figure 24 ✔ Comparaison du ZTD entre le traitement à 30 s et à 5s

On remarque que les graphes se superposent, il n'y a pas de différence visuelle entre les deux résultats. En zoomant sur une période on voit bien que la courbe des ZTD à 30s est plus lissée que le traitement à 5s. Cette dernière oscille autour la courbe à 30s.

Dans le graphe suivant on a calculé l'écart terme à terme entre les ZTDs.

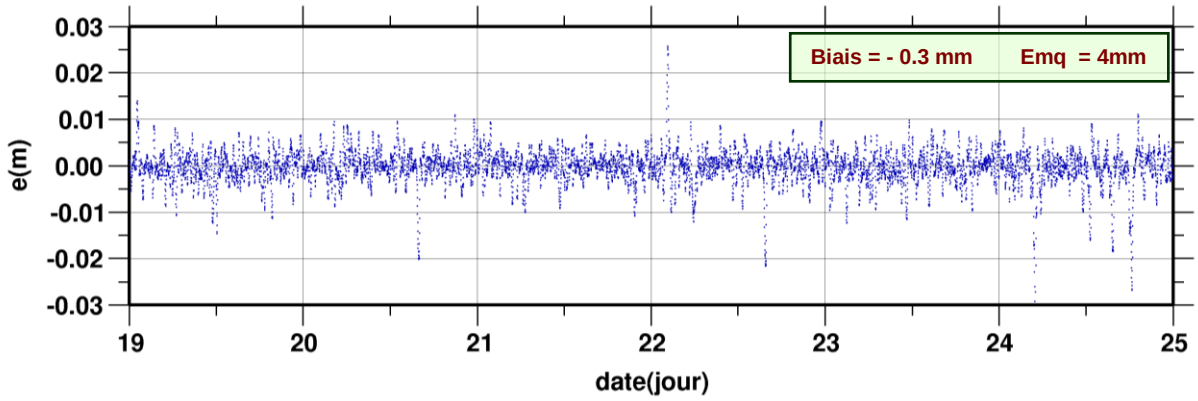


Figure 25 ✔ Ecart du ZTD entre le traitement à 30 s et à 5s

On remarque que l'ensemble des écarts est entre +-5mm. Le biais moyen entre les deux résultats est de l'ordre de -0.3 mm et l'écart type est de l'ordre de 4mm. Ces valeurs sont très faibles. Par contre on remarque l'existence de certains pics sur la courbe des écarts. Ces pics apparaissent sur des époques particulières. On va voir si ces pics se reproduisent sur les séries temporelles des coordonnées.

b) Comparaison des coordonnées

Le graphe suivant représente l'écart entre les coordonnées géographiques converti en m des deux traitements échantillonné toutes les minutes :

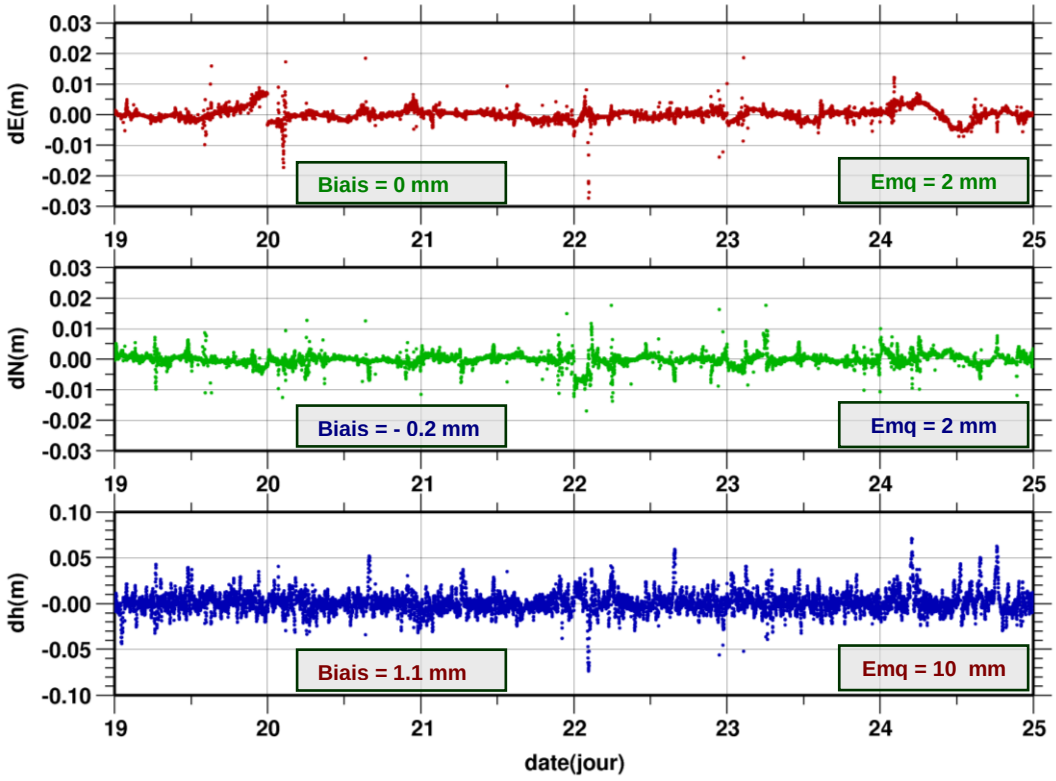


Figure 26 ✔ Ecart entre les séries temporelles entre le traitement à 30 s et à 5s

On remarque que l'écart entre les coordonnées est très faible. Pour la composante EST et NORD il n y'a pas de biais et l'écart type est de l'ordre de 2mm ce qui très faible. Pour la composante verticale il y a un biais de 1mm. Ce biais est négligeable pour le PPP et un écart type de 1cm. Cet écart type montre qu'il y a des époques où la solution est mauvaise. On remarque aussi que les pics sont situés à la même époque que pour les ZTDs.

Au niveau des paramètres de traitement ce qui diffère sont les paramètres du module "RNXSMT". Ces paramètres sont :

- *Sampling interval for Rinex data* : 5s ou 30s
- *Maximum gap in data to start a new arc* : longueur maximum de l'intervalle pour lequel une nouvelle valeur d'ambigüité est estimée. La longueur est 6 fois la

valeur de l'échantillonnage. Cela a pour conséquence de fixer beaucoup plus d'ambigüités dans le traitement à 5s. Donc plus de paramètre à estimer et moins de redondance.

- *Maximum gap for cycle slip correction*: longueur maximum de l'intervalle pour corriger un saut de cycle. Avec une faible période d'échantillonnage on va corriger moins de sauts de cycle avec la combinaison linéaire L4 et on gardera les sauts de cycles détectés auparavant par la combinaison linéaire L6 (Melbourne-Wuebbena).

Ces remarques se voient dans le graphe suivant :

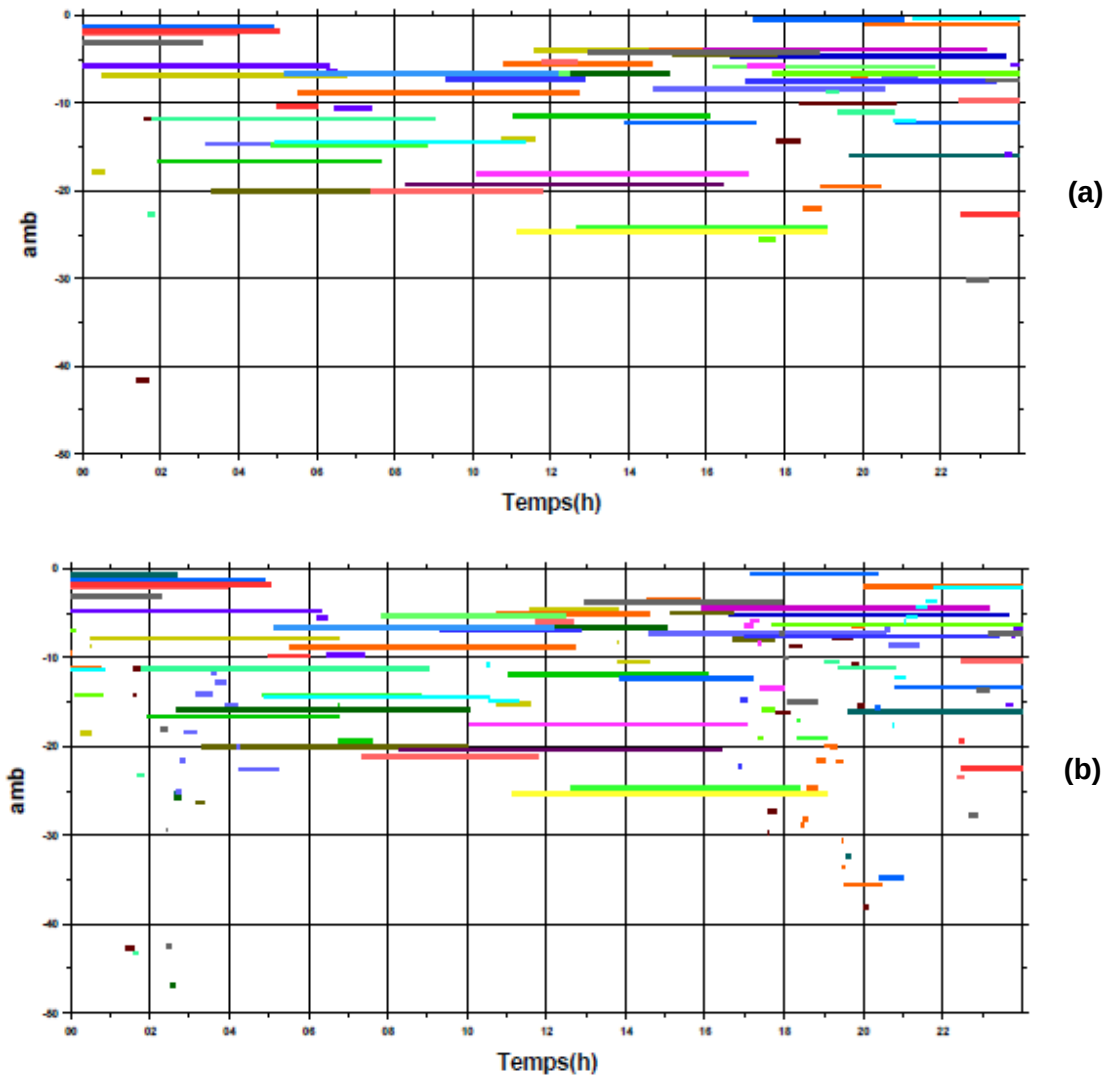


Figure 27 ✔ Ambigüités estimées pour un traitement à 30s (a) et un traitement à 5s (b)

Le graphe 27 représente les intervalles sur lesquels on été fixées des ambigüités pour tous les satellites pendant une journée de traitement à 30s (a) et à 5s (b). Pour chaque satellite on a la valeur de l'ambigüité et la durée sur laquelle elle a été estimée. Si on a beaucoup de petits intervalles cela signifie qu'il y avait plus des sauts de cycles détectés.

On remarque bien qu'il y a beaucoup plus d'intervalles dans le graphe (b) que dans le graphe (a). Donc avec un traitement de 5s on détecte beaucoup plus de sauts de cycle et on a plus de valeurs d'ambigüités à estimer.

L'analyse du fichier "GPSEST_F.out" montre que les pics correspondent aux époques ou il y a de nouvelles ambigüités estimées en 5s et n'apparaissait pas dans le traitement à 30s. On peut donc dire que les écarts sont une conséquence de l'estimation des ambigüités qui diffère d'un traitement à l'autre.

3. Surface de la mer

a) Objectif

A l'issue du traitement on dispose de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde de l'antenne GPS le long du trajet avec une précision de l'ordre de 5cm. Etant donné que le GPS est installé sur un bateau qui se déplace sur la surface de la mer ; proche d'une surface équipotentielle du champ de pesanteur, l'antenne détectera toutes les variations du modèle du géoïde.

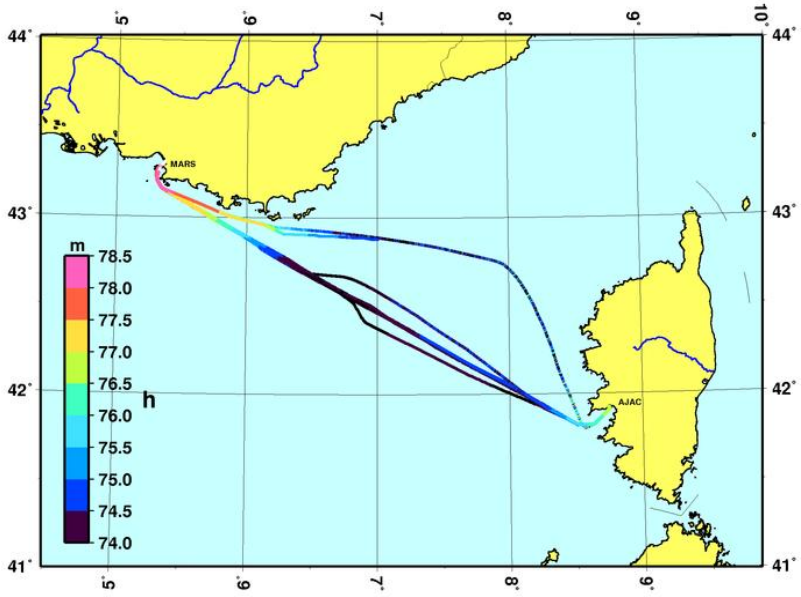


Figure 28 ✔ Variation de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde le long du trajet du bateau

L'objectif de cette étude est donc de déterminer une surface proche de la surface du géoïde à partir des données GPS sur un bateau.

b) Méthode et traitement des données

L'ensemble des opérations effectuées sur les résultats afin de trouver une surface proche de celle du géoïde est le suivant :

- Correction de la surcharge atmosphérique : L'atmosphère appuie une charge sur la surface de l'eau. Si on veut trouver la hauteur de la surface de l'eau on doit corriger la hauteur ellipsoïdale de la variation due à la charge appliquée par l'atmosphère. On dispose pour certains jours des données de pression. On va les utiliser pour corriger la hauteur de la surface de l'eau. La correction est de 1cm/HPa. Quand la pression est supérieure à la pression standard 1013.25HPa, il faut donc ajouter à la hauteur ellipsoïdale (P-Pstandard) *1cm.

- Lissage des séries temporelles de la hauteur au dessus de l'ellipsoïde avec une moyenne mobile pour enlever la houle et les vagues. Par la suite on va échantillonner les valeurs. On va prendre un point tout les 5mn. Cela correspond à un point tous les 3km étant donné que le bateau se déplace à une vitesse de 10m/s. Enfin on extrait de la série temporelle les positions quand le bateau est en mouvement.

  La figure suivante montre les résultats du filtrage et lissage de la série temporelle de h.

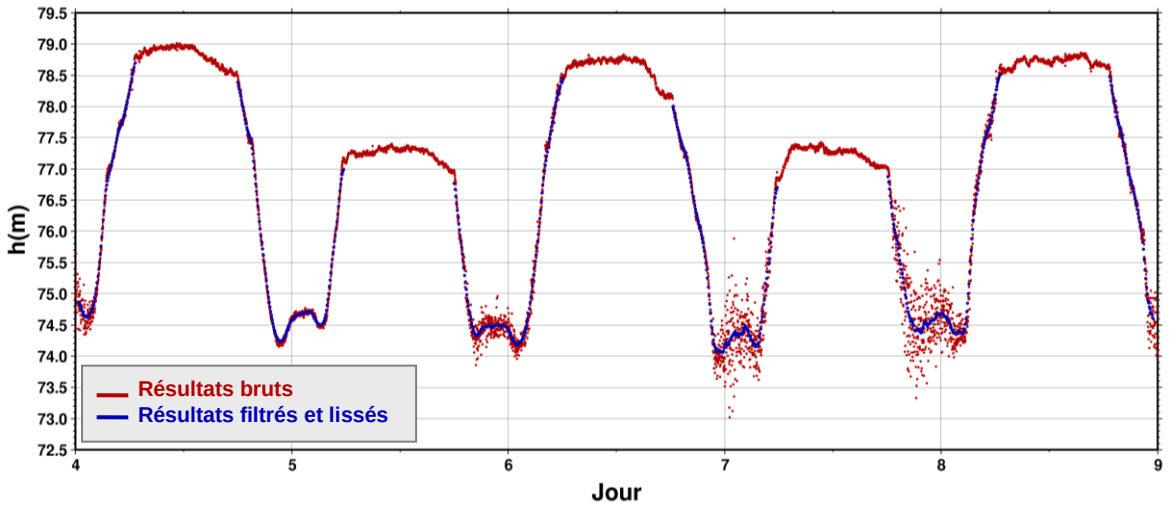


Figure 29 ✔ Lissage et filtrage de la série temporelle de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde

- Faire des coupes : On remarque que le bateau suit plusieurs fois le même chemin. On va déterminer l'ensemble des points appartenant à ces directions. Pour cela on va les projeter sur ces droites et s'ils sont à une certaines distances on suppose qu'ils appartiennent à cette droite.

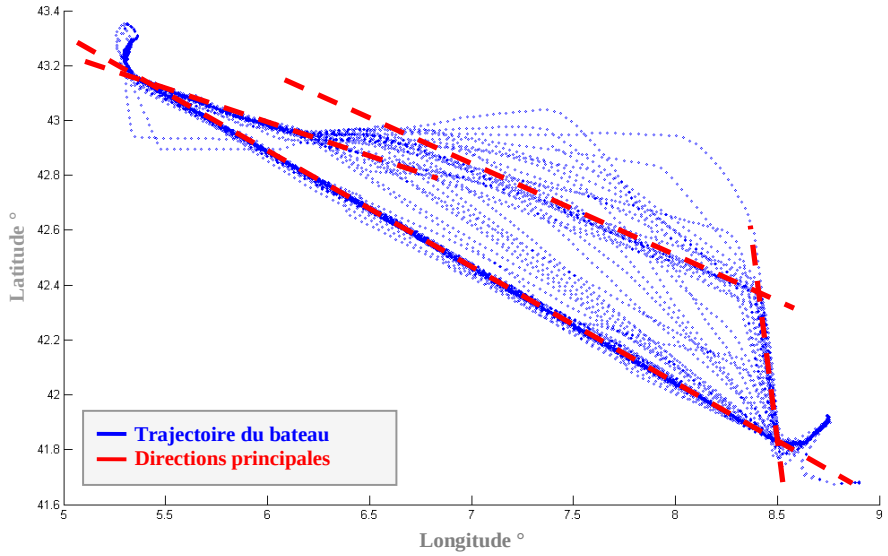


Figure 30 ✔ Directions principales suivies par le bateau

On va les extraire du reste des données puis les lisser.

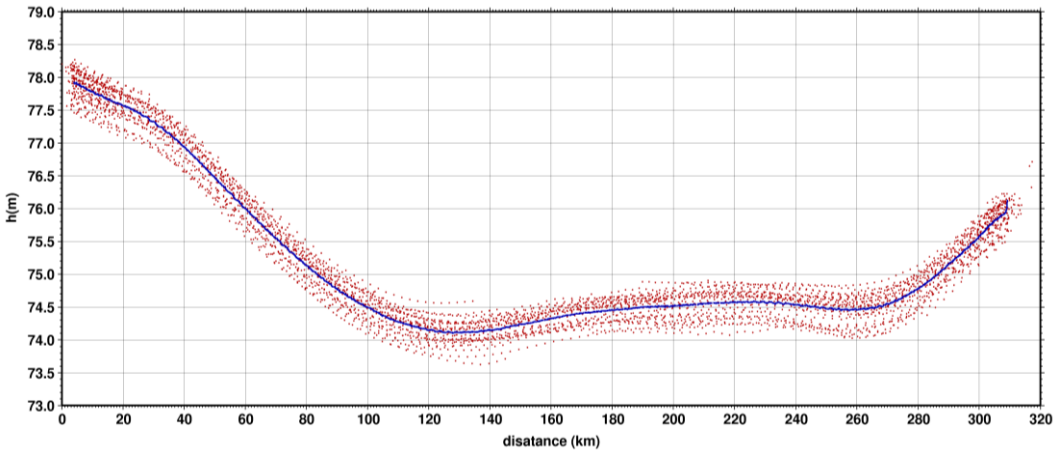


Figure 31 ✔ Lissage de la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde suivant une direction

De cette façon on obtient quatre directions dont on a lissé la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde. Par la suite on va extraire l'ensemble des points appartenant à ces directions et lisser le reste des points.

- Le problème qui se pose ici est qu'on ne dispose pas de la hauteur de l'antenne. On va donc utiliser un modèle de géoïde sur lequel on va plaquer la surface. Le second problème est qu'on n'a pas de points de mesures en-dehors de la zone convexe qui englobe l'ensemble des trajets. On va donc utiliser des points du géoïde pour calculer la surface. Pour cela on va chercher un écart moyen entre la hauteur au dessus de l'ellipsoïde et l'altitude au-dessus du géoïde. On va donc calculer en chaque point du trajet l'altitude via une interpolation bilinéaire en utilisant la grille EGM08. Par la suite on calculera une ondulation moyenne qui sera appliquée pour transformer la hauteur au dessus de l'ellipsoïde en altitude. Ce qui donne :

$$N_{moy} = 28.68m \qquad Emq = 0.22m \qquad \max(N) - \min(N) = 1.5m$$

- Calcul de la surface en utilisant l'ensemble des points déjà lissé. Le calcul se fait en utilisant Surfer.

Remarque :

On a négligé la variation de masse du bateau en fonction de la consommation. Si le bateau consomme toute la quantité de carburant on aura une variation de la hauteur de 5cm. Ce qui nous donne une variation de 5mm par heure. Ces variations sont négligeables vue la précision souhaitée.

c) Résultats

Le graphe suivant montre la forme du géoïde tel qu'on l'a approximé avec la méthode décrite ci-dessus.

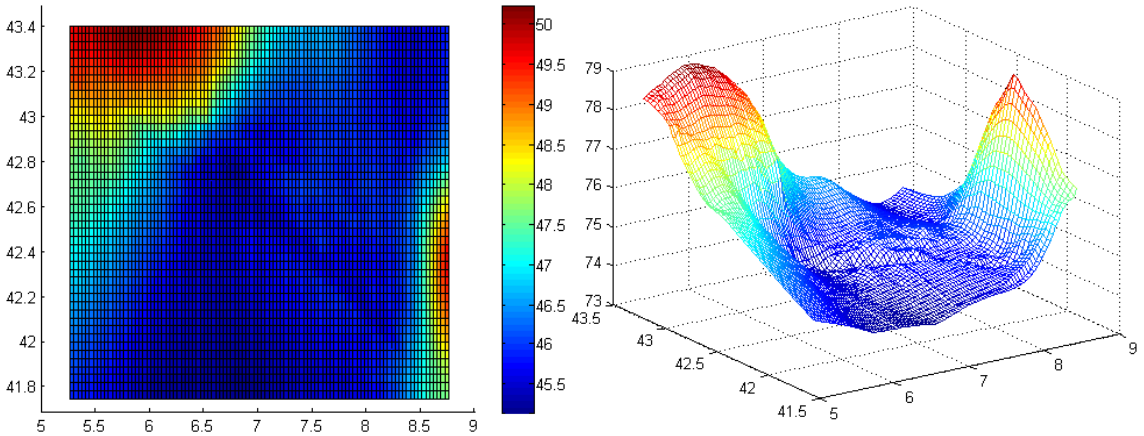


Figure 32 ✔ Surface approximative de la surface du géoïde

La comparaison de cette surface avec le modèle du géoïde montre que les deux surfaces sont plus ou moins similaires. La surface du modèle est plus lissée et décrit des grandes longueurs d'ondes. Par contre la surface issue du bateau est moins lissée et décrit plus de relief. Le graphe suivant montre la surface approximative (a) et un extrait du modèle de géoïde EGM08 (b) :

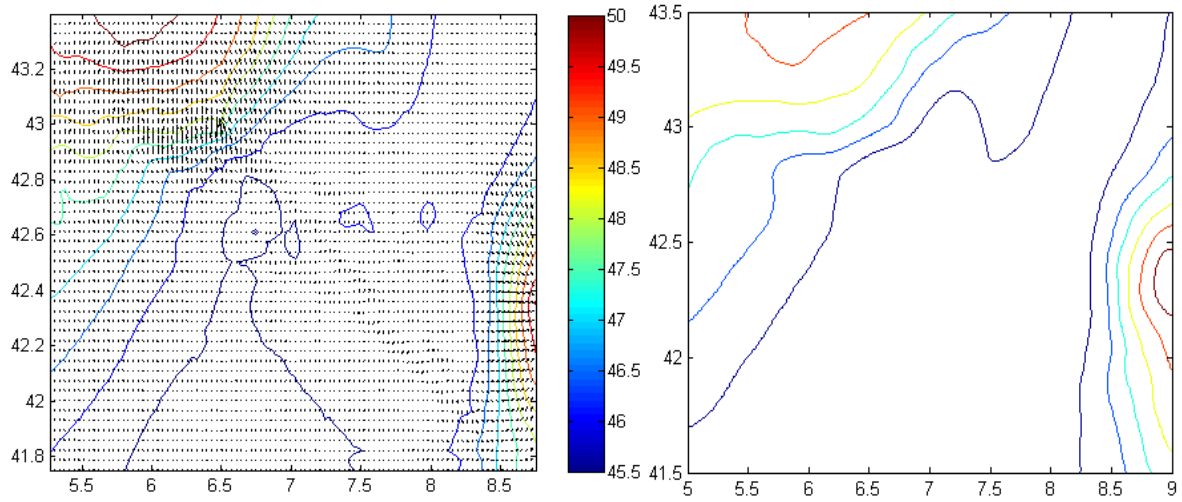


Figure 33 ✔ Comparaison avec le modèle de géoïde EGM08

Par la suite on a calculé l'écart en chaque nœud de la grille et on l'a rapporté sur les graphes suivants :

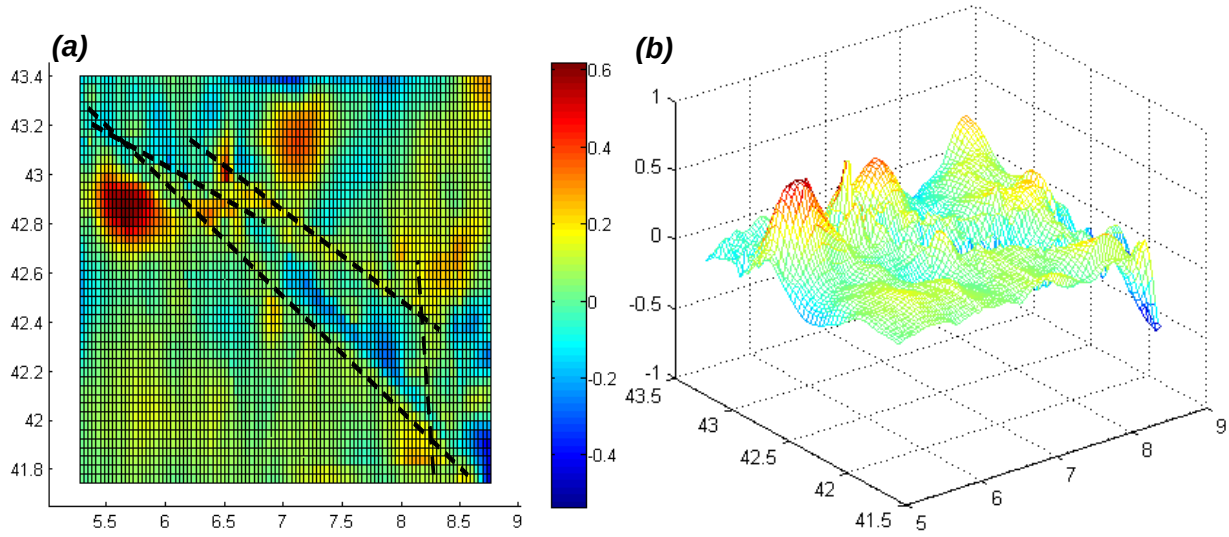


Figure 34 ✔ Ecart par rapport au modèle de géoïde

Le biais moyen entre les deux surfaces est de l'ordre de 0.036 m et un écart moyen quadratique de 0.124m. L'écart entre le min et le max est de l'ordre de 1.15m. Les bosses coloriées en rouge sont dues au manque de points en-dehors de la zone convexe. On

remarque que sur le long des trajets principaux l'écart est faible. Le tableau suivant résume les biais entre les directions principales et le modèle du géoïde :

	Biais (m)	Emq (m)	max-min (m)	Nb de point	Distance (km)	Densité de pt
droite1	0.0396	0.0511	0.25	4388	341.855	13points/km
droite2	-0.0531	0.0493	0.21	371	100.770	4points/km
droite3	0.1314	0.0798	0.86	510	279.185	2points/km
droite4	-0.0183	0.0789	0.48	1203	273.887	4points/km

On remarque bien que les écarts sur les directions filtrées et lissées sont relativement faibles par rapport à l'ensemble des écarts. Par contre sur la direction N°3 les écarts sont plus forts. Cela est dû au nombre de points de cette droite et la longueur de ce trajet. La densité de points est très faible. En faisant un lissage avec ces points on déforme un peu le modèle.

En conclusion, on peut dire que cette approche a montré des résultats assez satisfaisants. Si le bateau avait effectué plus de trajets sur le même chemin, on aurait obtenu un meilleur lissage. Si on avait utilisé les mesures de l'altimétrie radar, on aurait pu améliorer ce modèle. Enfin l'amélioration de la précision de cette méthode peut nous permettre de faire un pont entre le marégraphe de Marseille et la Corse. Cette étude peut donc servir comme première ébauche pour permettre de rattacher le système d'altitude de la Corse à celui de la France métropolitaine

CONCLUSION

Dans le cadre de ce projet, la campagne a été traitée en utilisant le noyau de calcul du SGN modifié via l'interface développée. Les résultats ont montré que le traitement des données GPS en mode PPP en cinématique est précis et exact en le comparant à la solution journalière du RGP (une exactitude de 1cm et une précision de 2cm en planimétrie et 5cm en altimétrie). De plus, la comparaison des ZTDs calculés en mode PPP cinématique avec la solution EGVAP a montré que les résultats sont similaires et aussi précis. Donc c'est possible d'utiliser les ZTDs issus du noyau du calcul pour extraire la partie humide du délai zénithal. On peut donc intégrer ces données dans les modèles de météo pour améliorer les prévisions de précipitation en mer puisqu'on dispose d'un outil assez précis pour le calcul des ZTDs à partir des données GPS collectées en mer. La précision atteinte en PPP en mode cinématique est très bonne. Il faut chercher à l'améliorer en fixant les ambigüités à des valeurs entières.

Le test fait sur la détermination d'une surface proche du géoïde montre des résultats satisfaisants. Il faut améliorer cette méthode de traitement en faisant un meilleur lissage et filtrage des résultats. L'analyse des résultats montre que sur les trajets principaux on a des faibles écarts. Il faut donc multiplier les observations GPS sur le bateau et faire plusieurs fois les mêmes trajets. On pourra intégrer ces mesures avec d'autres données provenant par exemple des données d'altimétrie radar afin d'améliorer le modèle élaboré.

Enfin de point de vue personnel ce stage a été enrichissant. Il m'a permis pendant 5 mois de travailler sur un cas concret d'application de la géodésie spatiale dans un domaine scientifique, la météorologie : Comment on utilise les mesures GPS pour améliorer les prédictions des modèles météorologiques tels que la prédiction des précipitations. J'ai eu l'occasion de mettre en œuvre ce que j'ai appris et d'approfondir mes connaissances en géodésie spatiale en traitant la campagne GPS en PPP en mode cinématique. L'utilisation d'un logiciel scientifique de traitement de données GPS m'a permis d'acquérir de nouvelles connaissances en géodésie et sur la manipulation des données GPS afin d'avoir une position la plus précise possible en tenant compte des différents postes d'erreurs qui affectent les mesures GPS. Enfin, le nombre de sessions important à traiter m'a poussé à développer des scripts en perl et une interface facilitant le traitement et l'analyse des résultats.

BIBLIOGRAPHIE

Erik Doerflinger*. Les applications météorologiques du système de positionnement satellitaire GPS. Publié en août 2001*
Cet article présentes les différents domaines d'application du GPS dans le domaine de la météorologie.

François L'ecu*. Le logiciel Bernese de calcul GPS BERNESE version 5.0. Utilisation pratique et application dans le cadre du RGP.*
Ce document présente un cas d'utilisation pratique du logiciel Bernese pour traiter une compagne GPS. Il présente les différents paramètres des panneaux utilisés, l'enchaînement des traitements et leur automatisation.

Françoise Duquenne, Serge Botton et al*. Localisation et navigation par satellites. Publié en 2005*
Ce livre décrit de façon détaillée le système GPS ainsi que les différentes méthodes de positionnement.

K.Boniface et al*. High-resolution GPS zenith delay assimilation. Publié en Juillet 2009.*
Cet article décrit les apports de l'assimilation des du délai zénithal troposphérique dans les prévisions numérique de temps.

Jamel Asgari*. Etude de modèle prédictif dans un réseau de stations GPS permanentes. Publié en Novembre 2005*
Cette thèse présente l'ensemble des postes d'erreur qui affecte les observations GPS en vue de les éliminer ou bien de les estimer via un traitement en mode PPP.

Pierre Bosser*. Etude Développement et validation d'une méthode de calcul GPS intégrant des mesures de profils de vapeur d'eau en visée multi-angulaire pour l'altimétrie de haute précision. Publié en Juillet 2008*
Cette thèse décrit l'apport des mesures Lidar lors des traitements GPS. En passant par l'expliquant de l'influence de la troposphère et de sa modélisation sur la détermination précise de la composante verticale par GPS ; par la suite comment la mesure la vapeur d'eau par le Lidar; enfin, une étude le couplage entre Lidar -GPS

Rocken et al. *Precise positioning of ships and buoys en the open ocean.*
Cet article présente les résultats de traitement d'une campagne GPS fait sur un bateau qui a navigué environ trois mois dans l'océan Indien. Une comparaison est faite entre le traitement PPP et PPP RTK avec le logiciel RTNET

Rolf Dach, Urs Hugentobler, Pierre Fridez, Michael Meindl. *Bernese GPS software Version 5.0*. *Publié en Janvier 2007*
Manuel d'utilisation du logiciel Bernese V5.0. Il décrit les différents modules du logiciel, les stratégies d'estimations, les principes du GPS et les phénomènes qui affectent le positionnement.

Samuel BRANCHU. *Traitement des observations GPS pour la trajectographie aérienne. Publié en janvier 2007*
Ce document Présente une comparaison entre différents logiciels pour voir les possibilités de faire du PPP.

Samuel BRANCHU. *Manuel utilisateur de KIN_PPP version 1*. *Publié en Novembre 2008*
Ce document décrit de façon détaillé l'outil de calcul développé par Alain Harmel au sein du SGN pour faire du PPP en mode cinématique.

Samuel NAHMANI, Olivier BOCK. *GPS et troposphère*. *Publié le 13 Mars2009*
Ce document décrit l'effet de la troposphère sur les mesures GPS et comment on modélise le retard troposphérique.

CPAN. Comprehensive Perl Archive Network
< http://www.cpan.org>
Ce site permet de télécharger des modules perl pour compléter les modules installés par défaut.

Perl version 5 .10.0 documentation.
< http://perldoc.perl.org/>
Ce site présente une documentation complète pour apprendre à programmer avec Perl. Il décrit l'ensemble des fonctions existantes et propose des exemples de script.

< http://gmt.soest.hawaï.edu/>
Ce site décrit la Standard

< http://gmt.soest.hawaï.edu/>
Ce site décrit les différents outils de GMT permettant de manipuler les données et les représenter.

< http://www.imagemagick.org/>
Ce site décrit les différentes fonctionnalités de la bibliothèque Image-magick et il présente des exemples de code.

ANNEXES

Annexe 1 : Postes d'erreur GPS

Les observations GPS sont entachées d'un certain nombre d'erreurs. Pour faire du Positionnement Ponctuel Précis il faut éliminer ces erreurs. Ce paragraphe présente l'ensemble des postes d'erreur qui affectent les mesures GPS.

Erreur d'orbite et d'horloge du satellite

Pour le positionnement GPS, les coordonnées des satellites sont supposées être connues précisément, ce qui n'est pas tout à fait le cas. Les orbites des satellites ainsi que les décalages des horloges embarquées sont calculées par la station de contrôle principale, transmis aux satellites par les stations de contrôle et radiodiffusées dans le message de navigation. Le message de navigation contient les éléments képlériens à l'instant de référence et leurs variations temporelles dues aux perturbations d'orbites. L'erreur de l'horloge du satellite est exprimée par un polynôme de second degré dont les coefficients sont diffusés dans le message de navigation. Pour faire du positionnement ponctuel précis il faut utiliser des orbites et des horloges précises et provenant des même centres de calcul pour qu'il y ait une certaine cohérence entre les solutions. Pour cela, on utilise en PPP des orbites finales avec une précision de ~2.5cm estimées tous les 15mn et des horloges avec une précision de ~75ps estimées tout les 30s.

Effet relativiste

Les satellites en orbite subissent le champ de gravité terrestre. Étant donné que la mesure de distance est basée sur la mesure de temps et que le champ de potentiel gravitationnel modifie la fréquence d'une horloge placée dans ce champ, les mesures doivent donc être corrigées de cet effet. Les principaux effets concernent :

- La conversion des temps propres des horloges à bord en temps GPS.
- La conversion pour les horloges de récepteur au sol.
- La propagation des signaux entre les satellites et le sol.
- Le modèle dynamique de forces s'appliquant sur les satellites GPS
- L'expression des positions dans un système géocentrique tournant.

Décalage du centre de phase du satellite

Sur les satellites GPS le centre de phase (centre d'émission) et le centre de masse sont décalés. Comme les éphémérides précises sont données par rapport au centre de masse, et la mesure de distance est faite par rapport au centre de phase il faut donc rapporter tous les coordonnées par rapport au centre de phase.

Exemple : Décalages des centres de phase des antennes GPS utilisé par l'IGS, dans le système de coordonnées lié au satellite en mètres.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Block II/IIA	0.279	0	1.023
Block IIR	0	0	0

Phase Wind Up

Les satellites GPS transmettent des ondes circulaires polarisées à droite. La phase observée dépend donc de l'orientation des satellites et du récepteur. Donc la rotation du satellite ou des récepteurs autour de l'axe vertical va changer la mesure de phase d'un cycle. Ce phénomène s'appelle "Phase Wind Up". Le récepteur subit la rotation de la terre. Par contre le satellite subit des rotations pour orienter ses panneaux solaires vers le soleil. La variation de l'orientation relative entre les antennes satellites et récepteur a pour conséquence de changer la géométrie entre le satellite et le récepteur.

Cet effet est très petit pour les applications différentielles et négligeable pour des lignes de bases ne dépassant pas les 500km. Par contre pour du positionnement en absolu l'erreur peut être de l'ordre du dm en coordonnées et horloge récepteur. Vu le biais introduit par cette erreur, les centres de calculs IGS appliquent le Phase Wind up aux horloges et orbites. Il est aussi pris en compte dans le Bernese.

DCB et TGD

Le DCB est le décalage d'émission (ou de réception) entre fréquences des signaux GPS. Ce délai existe aussi bien pour les satellites que pour le récepteur. Pour des raisons de cohérence, les orbites et les horloges précises et radiodiffusées se réfèrent à la combinaison ionospheric free. Donc l'utilisateur mono fréquence doit utiliser les valeurs de DCB des satellites. Différents types de codes impliquent différentes sortes de DCB. Il y a deux sortes de DCB : $P1 - P2$ et $C1 - P1$.

- P1 − P2 est le biais entre les mesures des codes P1 et P2. Il est, typiquement, de l'ordre de quelques nanosecondes.

- C1 − P1 est le décalage d'émission des signaux C/A et P1 du satellite et du récepteur. Une partie de ce DCB dépend du satellite et une partie constante est due au récepteur. C1 − P1 peut être calculé en moyennant les différences entre codes C/A et P1. Certains récepteurs n'ont pas la possibilité de mesurer P1. Pour ces récepteurs il faut appliquer le biais qui existe entre le code C/A et le code P1 qui dépend des satellites. Le DCB est de l'ordre de 2 ns (60 cm). Les DCB sont uniques pour chaque satellite et leur changement est faible au cours du temps.

TGD : Délai Différentiel de Groupe. C'est le délai entre L1 et L2 ou plus précisément P1 et P2 pour chaque satellite. Les TGD sont estimés par le constructeur.

Variation du centre de phase de l'antenne

Le point par rapport à lequel se fait la mesure est le centre de phase. C'est le point de réception des signaux GPS. Donc on doit connaître précisément la position de ce point.

Il est en général différent du centre géométrique de l'antenne et diffère selon la porteuse mesurée (L1 ou L2). Ce point n'occupe pas une position fixe. Sa position varie en fonction de l'incidence (élévation, azimut) et de l'intensité du signal mesuré. Cette variation peut être assez grande et le biais introduit sur la composante verticale peut arriver jusqu'`a quelques centimètres. "PHAS_COD.I05"

Bruit du récepteur

Il est évalué à 1% de la longueur d'onde du signal mesuré.

	Longueur d'onde	Bruit
Code C\A	300 m	1 à 3 m
Code P	30 m	0.1 à 0.3m
Phase	0.2m	2mm

Multi-trajet

Le trajet multiple est dû à la réflexion du signal GPS sur une surface proche de l'antenne et qui interfère avec le signal direct. Le GPS va recevoir donc un signal via un autre trajet que celui direct. L'erreur en distance est inférieure à la longueur d'onde mais elle peut affecter la résolution des ambigüités. Pour éliminer les multi-trajets on peut :

- Utiliser une antenne munie d'un plan absorbant ou de type "choke ring".
- Choix de l'angle de coupure.
- Éviter les surfaces réfléchissantes.
- On peut détecter les multi-trajet en post traitement : des résidus fort sur une temps très faible et se répètant périodiquement.

Saut de cycle

Un saut de cycle est le changement rapide d'une mesure de phase en nombre entier. Ce phénomène n'affecte pas la partie fractionnaire de la phase. La cause d'un saut de cycle est la perte de réception du signal d'un satellite pendant un certain temps, ou des problèmes matériels. Il y a plusieurs méthodes pour la détection et la correction des sauts de cycle. La détection se fait habituellement par les différentes combinaisons des mesures.

Traversée de l'atmosphère (troposphère et ionosphère)

L'atmosphère est divisée en plusieurs couches avec des propriétés différentes. En traversant l'atmosphère, les ondes émises par les satellites GPS sont affectées par un délai de propagation qui se manifeste en un délai ionosphérique et un délai troposphérique.

- Ionosphère : c'est la couche de l'atmosphère qui s'étend de 50 à 1000km d'altitude. C'est un milieu dispersif, ionisé par l'action des radiations solaires. Le retard ionosphérique dépend de la fréquence de l'onde et du contenu total en électron TEC. L'erreur sur la distance varie de 1 à 100m. En traitement pour éliminer l'effet de l'ionosphère on utilise une combinaison linéaire de phase L1 et L2 appelé L3 (iono-free)
- Troposphère : l'effet de troposphère est décrit dans le chapitre 2 et dans l'annexe qui suit.

Effet de marée terrestre

La déformation de la croute terrestre induit un mouvement de la station. Ces déformations sont dues à l'effet des surcharges océanique et atmosphérique, aux marées terrestres, aux mouvements des pôles. Différentes modélisations permettent d'appréhender correctement ces phénomènes et de réduire leur impact sur la position

La marée terrestre est la déformation élastique de la terre causée par l'attraction de la lune et du soleil, elle dépend du temps et de la position. Dans le positionnement relatif, pour des distances de quelques dizaines de kilomètres, cet effet est négligeable, mais pour le positionnement relatif « longue ligne de base », il est important d'en tenir compte. La marée terrestre est de l'ordre de quelques décimètres verticalement et quelques centimètres en longitude et en latitude.

Le déplacement d'une station peut être exprimé par des harmoniques sphériques caractérisées par les nombres de Love et de Shida dépendant de la latitude et de la fréquence de marée. La marée terrestre a une partie périodique et une partie permanente. Dans des traitements « longue durée », la marée périodique n'affecte pas le résultat, seule la partie permanente est à enlever mais pour des traitements plus courts (comme en cinématique) il faut appliquer la correction totale.

Effet de surcharge océanique

La charge océanique est le déplacement de la croûte terrestre dû à la marée océanique. La grandeur de ce déplacement est de l'ordre de 0 à 7cm au bord des océans et est très faible loin des côtes.

Les ondes principales de marées sont : M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm et Ssa. L'onde M2 a la plus importante contribution à l'effet de charge océanique, son amplitude peut atteindre jusqu'à 5cm en composante radiale et 1cm en composante horizontale pour les stations côtières.

Equations d'observations

Il y a deux observables principales en GPS : la pseudo-distance et la phase. Compte tenu des erreurs précédemment décrites les équations d'observations s'écrivent de la façon suivante :

$$P_{r,i}^k = \rho_r^k - (\delta t_r - \delta t^k)c + d\rho_{orb} + d\rho_{tide} + \delta ion_{r,i}^k + \delta trop_r^k + \delta_{rel}^k + \delta m_{r,p}^k + c(b_{r,i} + b_i^k) + \varepsilon_p$$

$$L_{r,i}^k = \rho_r^k - (\delta t_r - \delta t^k)c + d\rho_{orb} + d\rho_{tide} + d_{wup}^k + \lambda_i N_{r,i}^k - \delta ion_{r,i}^k + \delta_{rel}^k + \delta trop_r^k + \delta m_{r,\varphi}^k + c(b_{r,i} + b_i^k) + \varepsilon_\varphi$$

Avec : r : Le récepteur

k : Le satellite

i : Les mesures sur les fréquences L1 ou L2 respectivement

ρ_r^k : Distance géométrique entre le récepteur et le satellite

$d\rho_{orb}$: L'erreur orbitale.

δt_r : L'erreur d'horloge récepteur.

δt^k : L'erreur d'horloge satellite.

λ_i : La longueur d'inde de Li

$N_{r,i}^k$: ambiguité de la phase Li et le satellite k

c : la vitesse de la lumière.

$d\rho_{tide}$: Effet de la marée terrestre et de la surcharge océanique sur la distance géométrique.

d_{wup}^k : Effet du wind up

$\delta ion_{r,i}^k$: Le délai ionosphérique

$\delta trop_r^k$: Le délai troposphérique

δ_{rel}^k : L'effet relativiste.

$\delta m_{r,p}^k$: Le multi-trajet de code

$\delta m_{r,\varphi}^k$: Le multi-trajet de phase

$b_{r,i}$: Le biais électronique du récepteur

b_i^k : Le biais électronique du satellite

ε_p : Bruit de mesure de code.

ε_φ : Bruit de mesure de phase.

Annexe 2 : Modélisation du retard troposphérique

Délai troposphérique

Le délai troposphérique ΔL s'écrit comme la différence entre la distance géométrique L pondérée de l'indice de réfraction parcourue par le signal le long de sa trajectoire et la distance G parcourue en ligne droite s'il se propageait dans le vide.

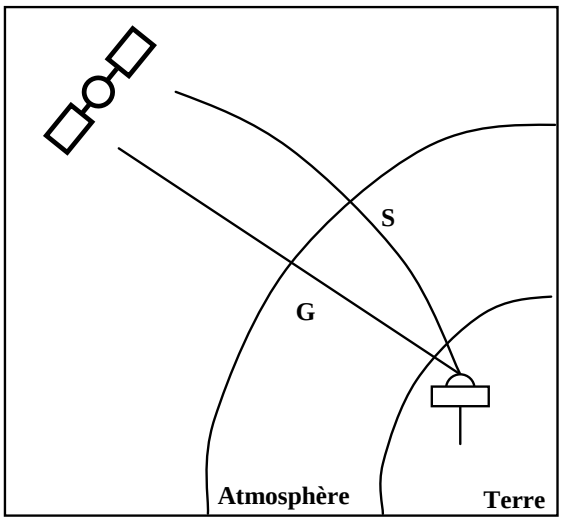


Figure 35 ✔ Géométrie de l'allongement troposphérique du signal GPS

En considérant la distance géométrique S parcourue le long de la trajectoire du signal, le délai troposphérique s'écrit :

$$\Delta L = L - G = (L - S) + (S - G) = \Delta L_{vit} + \Delta L_{geo}$$

Le premier terme exprime le retard de propagation du signal en raison de la variation de l'indice de réfraction dans la troposphère. Le second terme correspond à l'effet de courbure. Il est négligeable, puisqu'il représente ~ 0,1 % du délai total.

En introduisant la réfractivité le délai s'écrit :

$$\Delta L \sim= \int (n-1) ds = 10^{-6} \int N ds$$

Indice de réfraction

Il est possible de séparer l'indice de réfraction N en deux parties : la partie due à l'air sec N_d et la partie due à l'air humide N_w.

$$N = N_d + N_w$$

Avec : $N_d = k_1 \frac{P_d}{T}$

$$N_w = k_2 \frac{P_v}{T} + k_3 \frac{P_v}{T^2}$$

Ou : P_v : Pression partielle de la vapeur d'eau

P_d : Pression partielle de l'air sec

k_i : Constantes de réfractivité

T : Température

Généralement on décompose la réfractivité en un terme hydrostatique et un terme humide.

$$N = N_h + N_w$$

Avec : $N_h = k_1 R_d \rho$

$$N_w = \left(k_2^{'} + \frac{k_3}{T} \right) R_v \rho_v$$

Densité de l'air : $\rho = \rho_v + \rho_d$ $\qquad \rho_d = \frac{P_d}{R_d T}$ $\qquad \rho_v = \frac{P_v}{R_v T}$

Modèles de troposphère

Il y a plusieurs modèles pour calculer le délai troposphérique total. Ces modèles incluent la partie hydrostatique et la partie humide. Dans la suite on se contente de présenter les modèles existant dans la version 5 du logiciel Bernese.

- SAASTAMOINEN: Le modèle de Saastamoinen est basé sur des lois relatives aux gaz parfaits. Le délai troposphérique est donné par l'´equation suivante :

$$DL = \frac{0.002277}{\cos z}\left[p + (\frac{1255}{T} + 0.05)e - B\tan^2 z \right]$$

Avec : p : Pression en hPa

e : Pression de la vapeur d'eau en millibar

T : Température en degré Kelvin.

- HOPFIELD: c'est un modèle empirique. Les indices de réfractivité sec et humide sont définis comme suit :

$$N_d(h) = N_{d0}\left(1 - \frac{h}{h_d}\right)^4 \qquad \text{Pour } h \le h_d = 43km$$

$$N_w(h) = N_{w0}\left(1 - \frac{h}{h_w}\right)^4 \qquad \text{Pour } h \le h_w = 12km$$

h est l'altitude de la station, N_{d0} et N_{w0} sont respectivement les indices de réfractivité sec et humide à la surface de la terre avec :

$$N_{d0} = K_1 \frac{P_0}{T_0}$$

$$N_{w0} = K_2 \frac{P_{v0}}{T_0} + K_3 \frac{P_{v0}}{T_0^2}$$

Le délai total est donné par la formule suivante :

$$d_{tro} = \frac{10^{-6}}{5}(N_{d0}h_d + N_{w0}h_w)$$

- ESSEN-FROOME: Ce modèle est appelé un modèle différentiel. Il permet de modéliser le délai troposphérique dans la couche situé entre le plus faible et le plus grand site.

- NIELL: Elle tient en compte des variations temporelles et géographiques du délai troposphérique.

Fonctions de projection

Ces fonctions permettent de projeter le délai total au zénith. Dans la suite on se contente de présenter les fonctions de projection présentes dans la version 5 du logiciel Bernese.

- COSZ: c'est la méthode la plus simple de ramener le délai troposphérique au zénith.

$$m(z) = \frac{1}{\cos(z)}$$

- Marini et Murray: la fonction d'élévation est une suite de fraction de $\frac{1}{\cos(z)}$:

$$m(z) = \cfrac{1}{\cos(z) + \cfrac{a}{\cos(z) + \cfrac{b}{\cos(z) + \cfrac{c}{\cos(z) + \ldots}}}}$$

Une amélioration de cette fonction est introduite par Herring :

$$m(z) = \cfrac{1 + \cfrac{a}{1 + \cfrac{b}{1 + c}}}{\cos(z) + \cfrac{a}{\cos(z) + \cfrac{b}{\cos(z) + c}}}$$

- DRY_NIELL et WET_NIELL: les deux fonctions ont la même formulation.

$$m(z) = \cfrac{1 + \cfrac{a_x}{1 + \cfrac{b_x}{1 + c_x}}}{\cos(z) + \cfrac{a_x}{\cos(z) + \cfrac{b_x}{\cos(z) + c_x}}}$$

Cependant les coefficients a, b et c de DRY_NIELL dépendent de la latitude, l'altitude et le jour par contre pour la fonction WET_NIELL ces coefficients dépendent uniquement de la latitude. Ces coefficients ne sont pas les mêmes.

Gradients horizontaux

L'utilisation d'un angle de coupure très bas permet d'améliorer les résultats du traitement GPS et de décorréler les différents paramètres. Avec un angle de coupure assez bas les hétérogénéités locales de la réfractivité de l'atmosphère s'amplifient. Pour remédier à ce problème on utilise des gradients horizontaux lors de l'estimation du délai troposphérique pour tenir compte des asymétries locales.

Dans le logiciel Bernese on a le choix entre deux modalisations de gradients : TILTING et LINEAR. L'utilisation du second modèle n'est pas recommandée.

Le graphe suivant représente le modèle de TILTING :

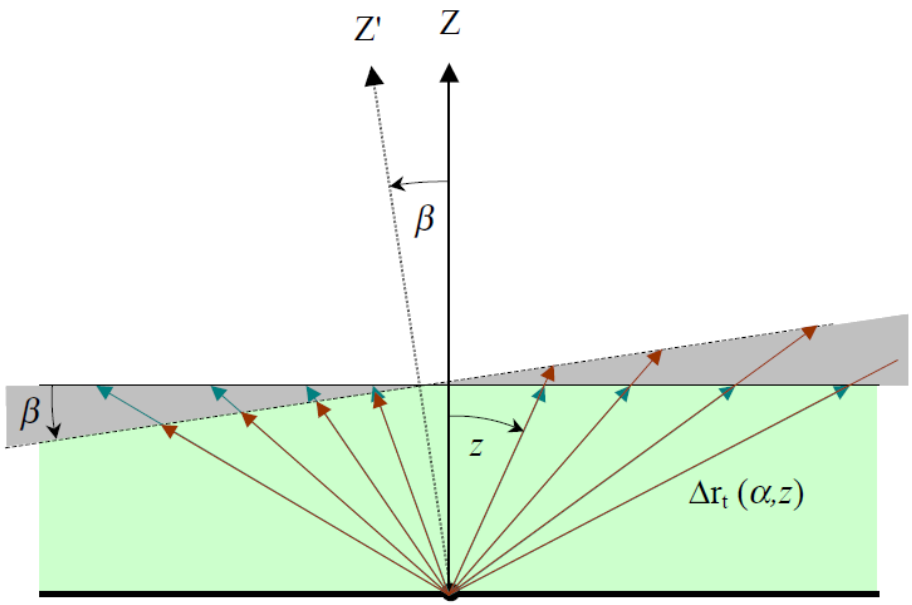


Figure 36 ✔ TILTING de la zénithal troposphérique avec un angle β

Le délai troposphérique total et ramené au zénith via une fonction de projection. Le problème ici est que le zénith géométrique et le zénith qui correspond au minimum du ZTD ne sont pas confondus. Cet écart est représenté par un angle (β sur le graphe). Cet angle est décrit par deux paramètres de gradient dans la direction NORD et EST.

Mise en équation

L'obtention d'une position précise dépend de la capacité des modèles de décrire les phénomènes physique, la possibilité d'éliminer les erreurs et les minimiser.

Pour éliminer l'erreur ionosphérique, la combinaison iono-free est utilisée. Elle consiste en :

$$P_3^k = (\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2})P_1^k - (\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2})P_2^k$$
$$L_3^k = (\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2})L_1^k - (\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2})L_2^k$$

Compte tenu des erreurs déjà présentées les observations GPS s'écrivent sous la forme suivante :

$$P_3^k = \rho^k - (\delta t_r - \delta t^k)c + d\rho_{orb} + d\rho_{tide} + \delta_{rel}^k + \delta_{trop}^k + \delta_{mup}^k + \varepsilon_p$$
$$L_3^k = \rho^k - (\delta t_r - \delta t^k).c + d\rho_{orb} + d\rho_{tide} + d_{wup}^k + \lambda_i N_{r,i}^k + \delta_{rel}^k + \delta_{trop}^k + \delta_{mu\varphi}^k + \varepsilon_\varphi$$

Une fois les erreurs qui restent modélisées ou éliminées les équations d'observation deviennent sous la forme :

$$P_3^k = \rho^k - c.\delta t_r + M.ZTD + \varepsilon_p$$
$$L_3^k = \rho^k - c.\delta t_r + \lambda_i N_{r,i}^k + M.ZTD + \varepsilon_\varphi$$

Le ZTD lui-même peut être écrit sous forme d'un modèle a priori, une correction et des gradients. Comme suit :

$$\Delta l_k^i(t, A, z) = \underbrace{\Delta l_{apr,k}(z_k^i)}_{\text{Modèle à priori}} + \underbrace{\Delta l_k^h f(z_k^i)}_{\text{ZTD}} + \underbrace{\Delta l^n(t)\frac{\partial f}{\partial z}\cos(A_k^i) + \Delta l^e(t)\frac{\partial f}{\partial \varepsilon}\sin(A_k^i)}_{\text{Gradients horizontaux}}$$

Où : $\Delta l_k^i(t, A, z)$: délai zénithal total à l'instant t entre le satellite i et la station k. Il dépend du temps, du zénith de l'azimut du satellite

$\Delta l_{apr,k}(z_k^i)$: la valeur du modèle a priori.

Δl_k^h , $f(z_k^i)$: la correction à estimer par rapport au modèle a priori et sa fonction de projection.

$\Delta l^n(t)$, $\Delta l^e(t)$: les deux paramètres NORD et EST à estimer pour le gradient.

z_k^i , A_k^i : Zénith et azimut du satellite i observé par la station k.

Dans le traitement on estime les coordonnées (XYZ), le biais de l'horloge récepteur, la valeur de la correction Δl_k^h, les deux composantes du gradient NORD Δl^n et EST Δl_k^e et les ambigüités $N_{r,i}^k$.

Annexe 3 : Logiciel Bernese

Présentation générale

L'interface utilisateur est développée en C++ en utilisant la bibliothèque Qt. Depuis cette Interface on fait appel aux différents fonctions du package Bernese ainsi que les panneaux. Les programmes de traitement sont écrits en Fortran. Le logiciel peut s'utiliser soit en mode interactif soit en mode automatisé (BPE : Bernese Processing Engine). Le BPE est développé en Perl.

Le logiciel tourne autour de trois principaux répertoires : BERN50, GPSDATA et GPSUSER.

- Le répertoire des scripts Perl de lancement du programme de traitement en mode automatique (BERN50/BPE).
- Le répertoire des exécutables (BERN50/GPS/EXE).
- Le répertoire des fichiers généraux contenant des informations sur les satellites, les récepteurs, les antennes…etc. (BERN50/GPS/GEN).
- le répertoire regroupant tous les sous dossiers contenant les fichiers « .INP » dans lesquels sont inscrites les options des programmes utilisés, pour le processus de calcul automatique, par le BPE (GPSUSER/OPT).
- Le répertoire contenant l'ensemble des panneaux servant à l'introduction des paramètres, données, constantes…etc. utilisés dans le traitement en mode interactif à partir du menu (GPSUSER /PAN).
- Le répertoire dans lequel sont regroupés tous les fichiers « .PCF » conçus pour les différents traitements automatiques avec le BPE (GPSUSER /PCF).
- Le répertoire des scripts principaux développés par les concepteurs du logiciel (GPSUSER /SCRIPT).
- Le répertoire de la librairie de tous les sous programmes utilisés par les programmes Fortran (BERN50/LIB).

- Le répertoire des programmes du menu (BERN50/MENU).
- Le répertoire des sources exécutables Fortran (BERN50/PGM).

Le répertoire GPSDATA est réservé aux données et traitements des différentes campagnes. Quant au GPSUSER il est principalement destiné aux scripts, fichiers PCF de l'utilisateur et aux options des programmes utilisés en mode interactif et automatisé.

GPSTOOLS : C'est un répertoire personnalisé qui contient l'ensemble des outils SGN et qui sont appelés au cours du traitement.

Les programmes de traitement :

Les programmes de la partie "traitements" sont au nombre d'une centaine, écrits en Fortran. Ces unités de programmes sont divisées en plusieurs niveaux :

- **Transfert :** Cette partie génère des fichiers au format Berne à partir des fichiers Rinex en entrée (observation, navigation, météorologie…).
- **Orbite :** Cette partie permet de générer des fichiers d'orbites et des fichiers d'horloge au format Berne à partir d'orbites de l'IGS. Elle permet également de comparer et de créer des fichiers d'orbites à partir des coordonnées de stations.
- **Pré-traitement :** Estimation des erreurs d'horloge du récepteur et détermination d'une position approché en utilisant le code (analyse des observations de codes non différenciées) ; Formation des simples, doubles et triples différences de phase ; Nettoyage des observations (hors-norme, détection et correction du saut de cycle)
- **Traitements :** Estimation des paramètres : coordonnées, paramètre de rotation du pôle (EOP), orbites, troposphère, ionosphère, ambigüités….
- **Simulation :** Simulation d'observation GPS et GLONASS (Simuler le rinex d'un point fixe, crée des rinex virtuels).
- **Services :** la partie services permet d'éditer et de parcourir les fichiers au format Berne, de comparer des jeux de coordonnées, d'extraire des informations des fichiers de sortie…

Ces programmes ne nécessitent aucune interaction durant leur exécution. Leurs options, la liste des fichiers d'observations et des fichiers auxiliaires au traitement sont mises à la disposition des programmes par l'intermédiaire de fichiers appelés Special Input Files "xxxx.INP".

Les panneaux

Le système de menu gère la préparation de ces fichiers d'entrée (Special Input Files) et lance les programmes de traitement. Il y a 5 panneaux commun à tous les répertoires de panneaux et des panneaux spécifiques aux programmes appelés.

- MENU.INP : gère le menu primaire du logiciel (taille, polices des caractères, etc.)
- MENU_CMP.INP : liste des campagnes
- MENU_EXT.INP : chemins et extensions pour tous les fichiers Bernese
- MENU_PGM.INP : fait la correspondance panneau édité↔programme exécuté
- MENU_VAR.INP : gère les variables utilisées dans le système de menu
- Un fichier .INP par programme spécifique, qui permet de saisir tout ce qui doit être précisé en entrée (option de traitement, fichier de sortie…).

Annexe 4 : Chaîne de calcul

Diagramme fonctionnel des différents modules

Orbite et paramètre de rotation

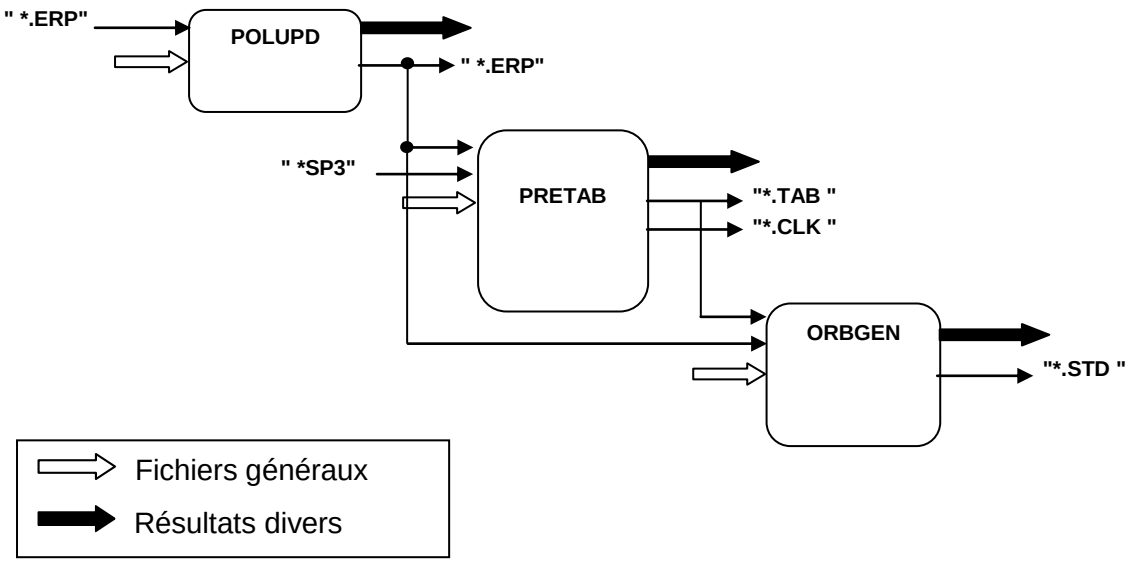


Figure 37 ✔ Digramme fonctionnel des modules Bernes pour la détermination de l'orbite et les paramètres de rotation de la terre

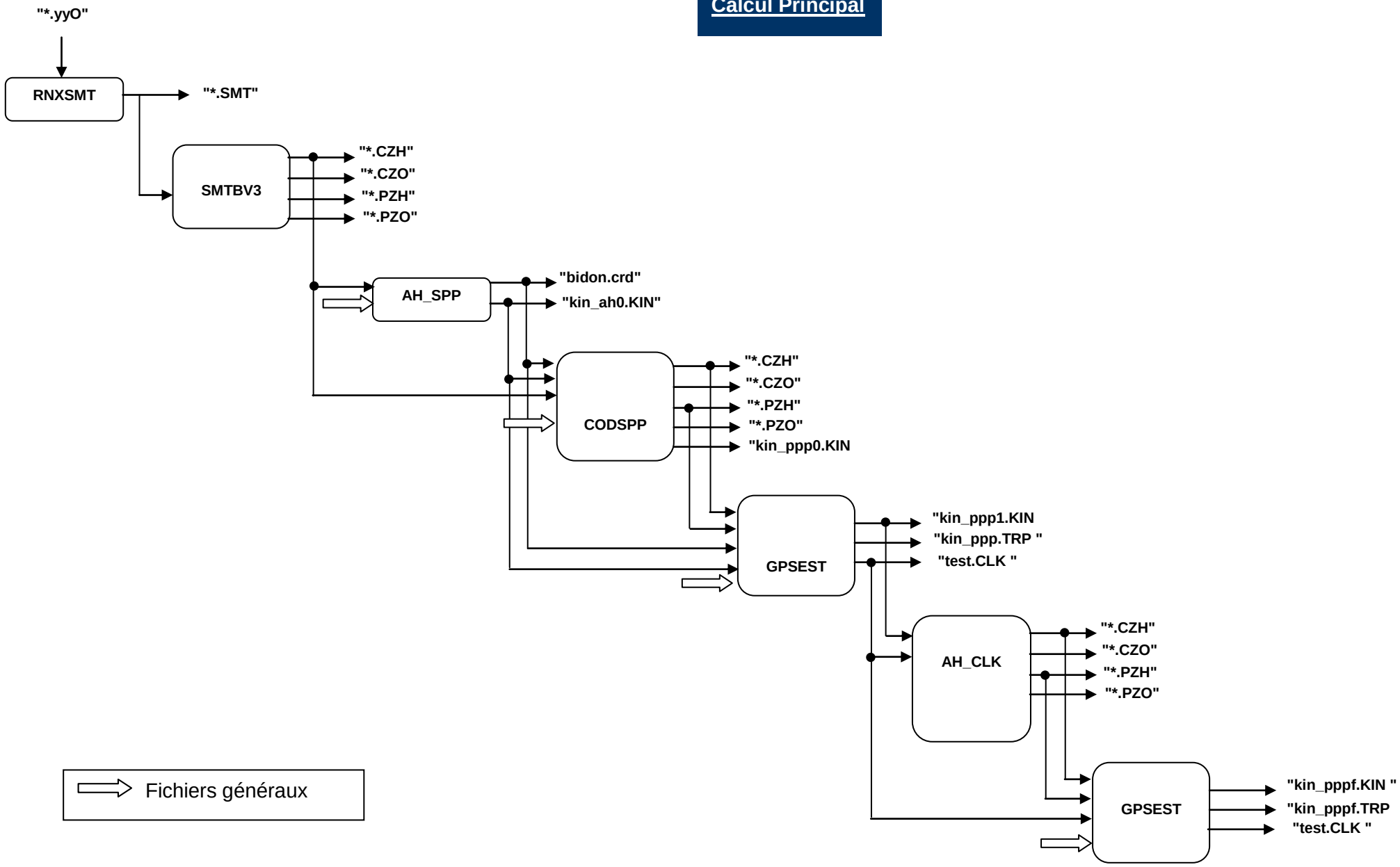
Mise en forme des résultats

Application des marées terrestre

Application des surcharges océaniques

Mise en référence dans l'ETRS89

Calcul Principal



Coordonnées des stations

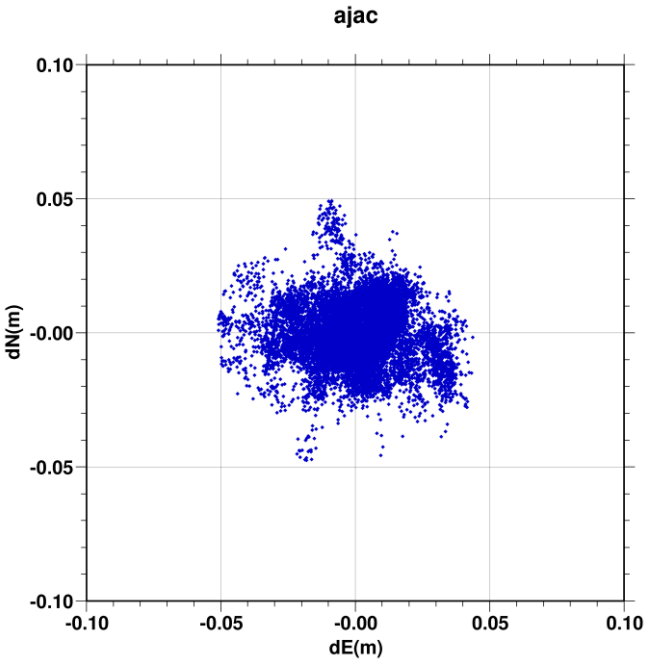


Figure 38 ✔ Dispersion du nuage de points de la station AJAC calculés en PPP

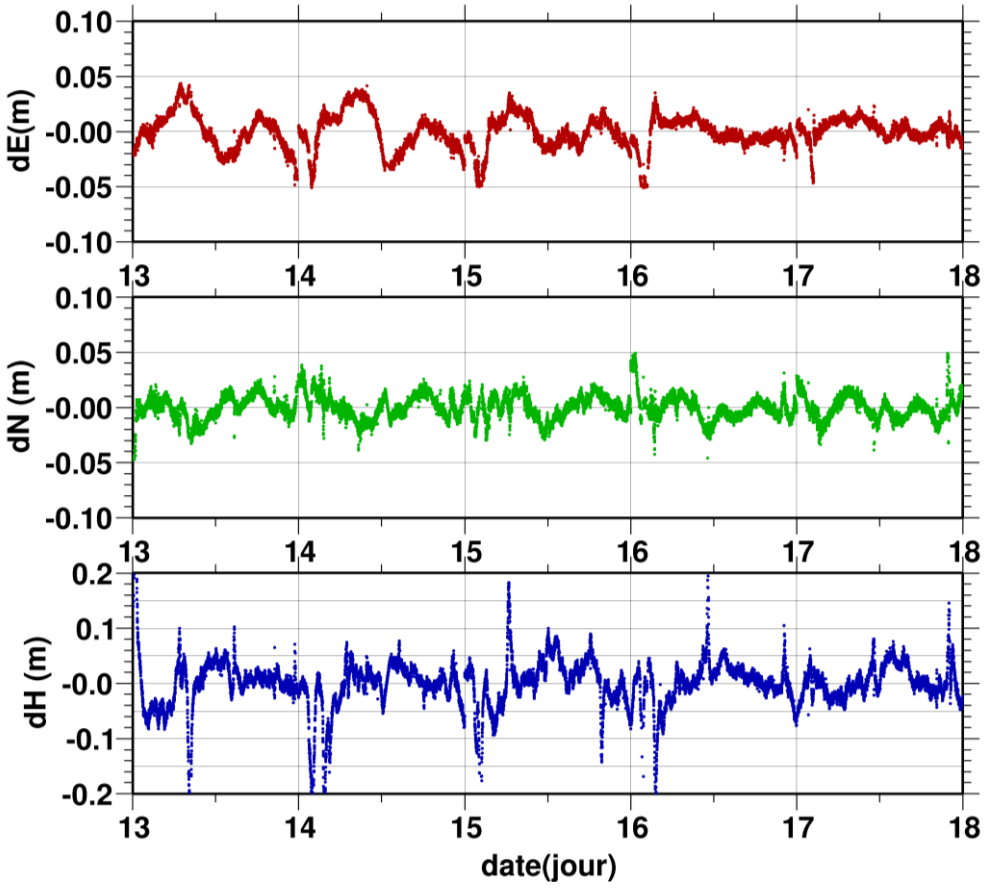


Figure 39 ✔ Série temporelle de la station AJAC

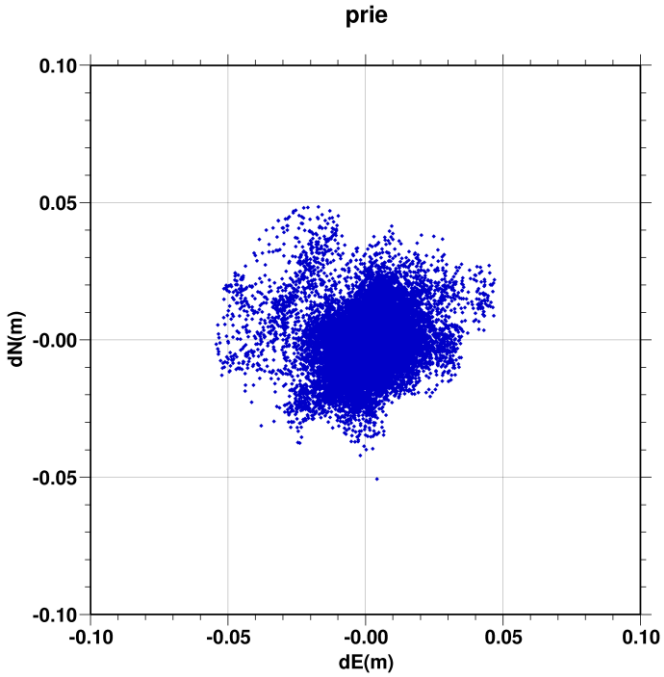


Figure 40 ✔ Dispersion du nuage de points de la station PRIE calculés en PPP

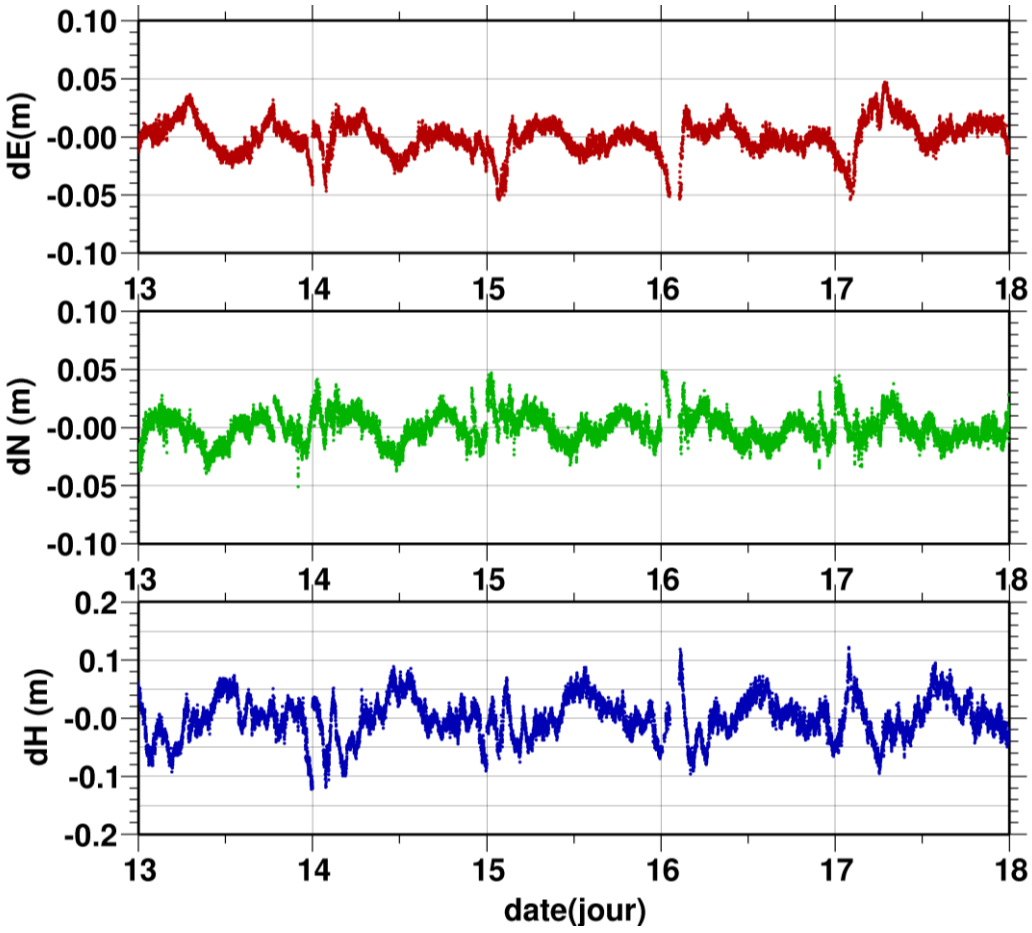


Figure 41 ✔ Série temporelle de la station PRIE

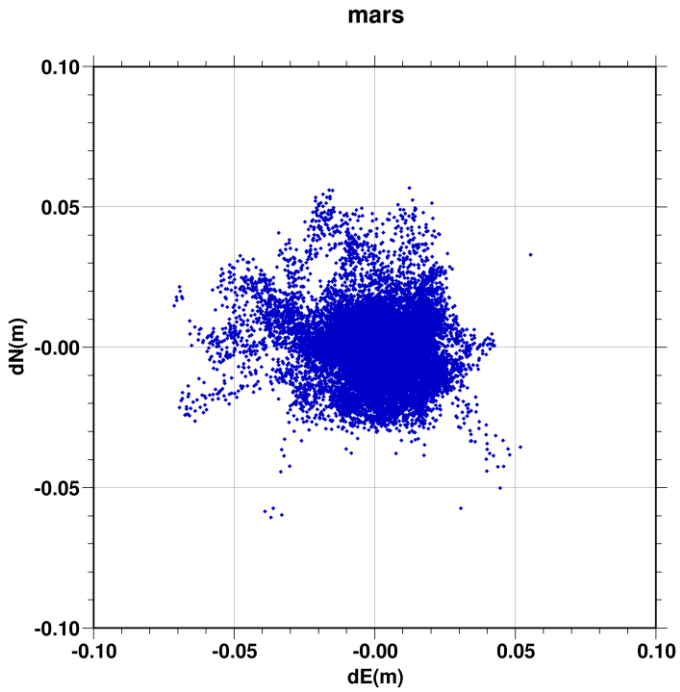


Figure 42 ✔ Dispersion du nuage de points de la station MARS calculés en PPP

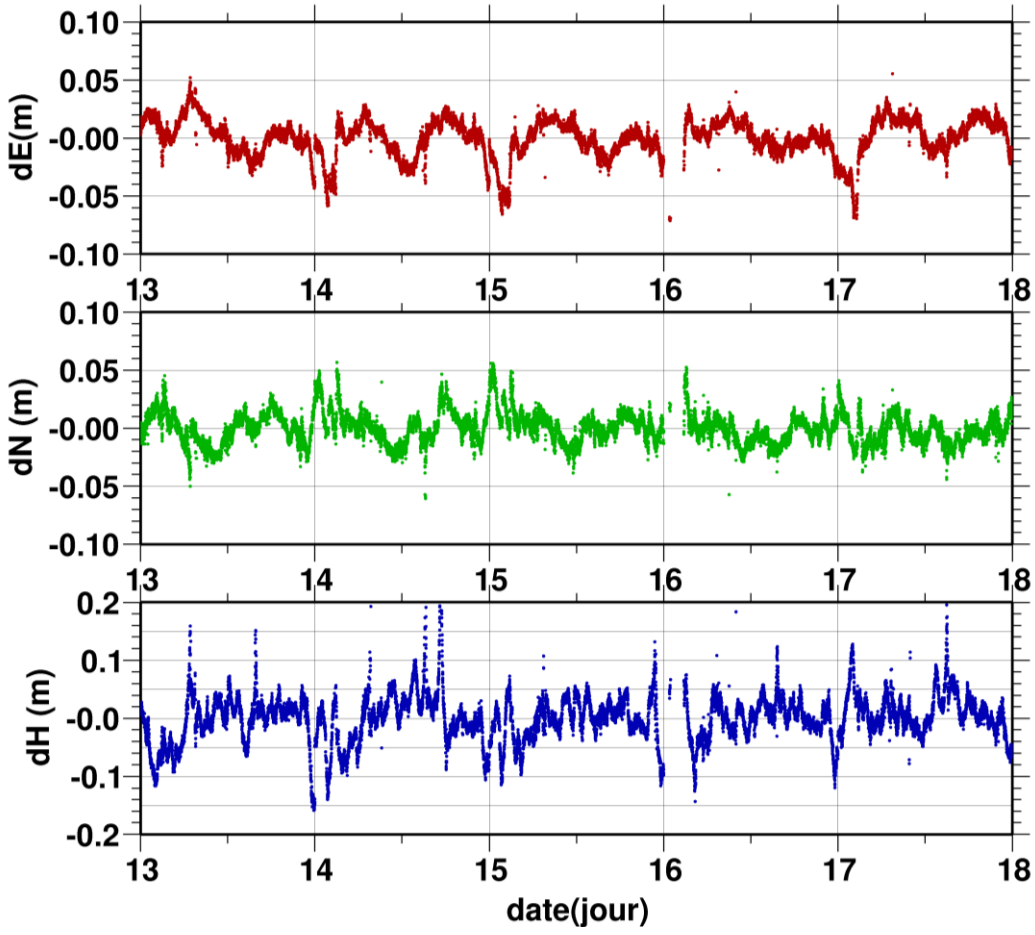


Figure 43 ✔ Série temporelle de la station MARS

Comparaison des ZTDs calculés à l'aide du noyau de calcul avec la solution RGP

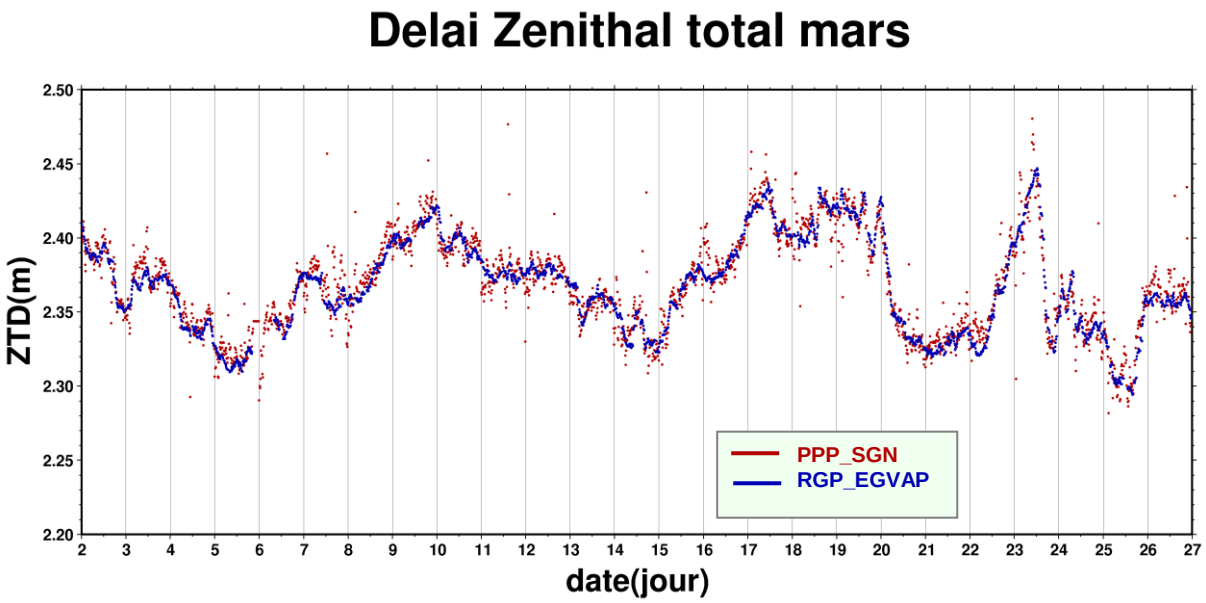


Figure 44 ✔ Comparaison du ZTD issu du noyau de calcul avec la solution journalière du RGP_EGVAP pour la station de MARS

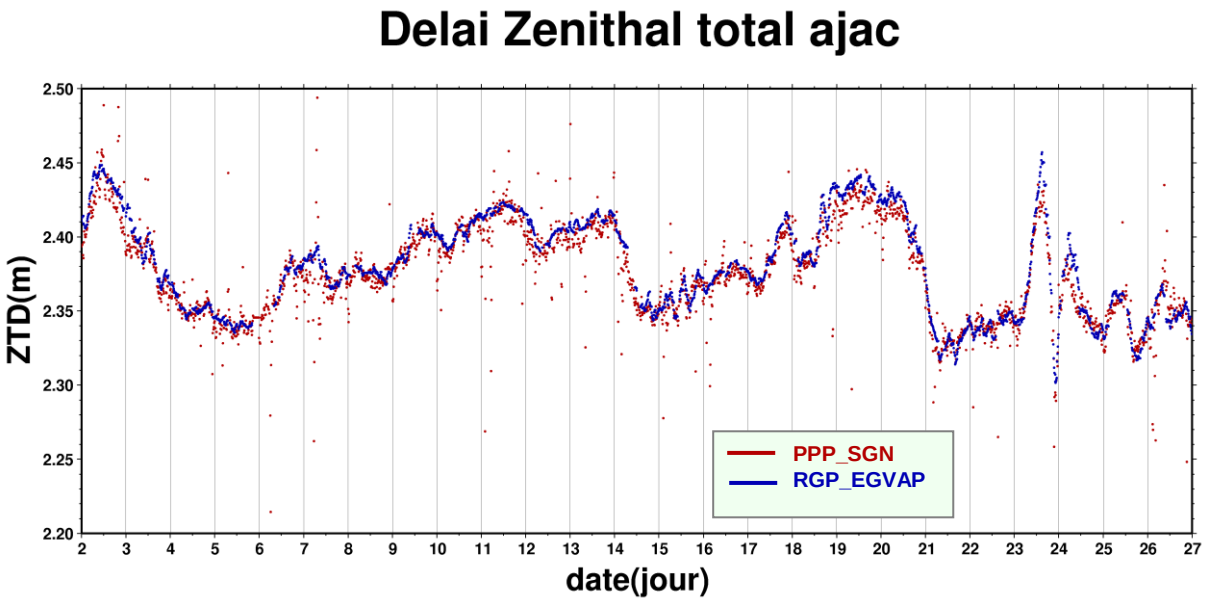


Figure 45 ✔ Comparaison du ZTD issu du noyau de calcul avec la solution journalière du RGP_EGVAP pour la station d'AJAC

Annexe 5 : Résultats

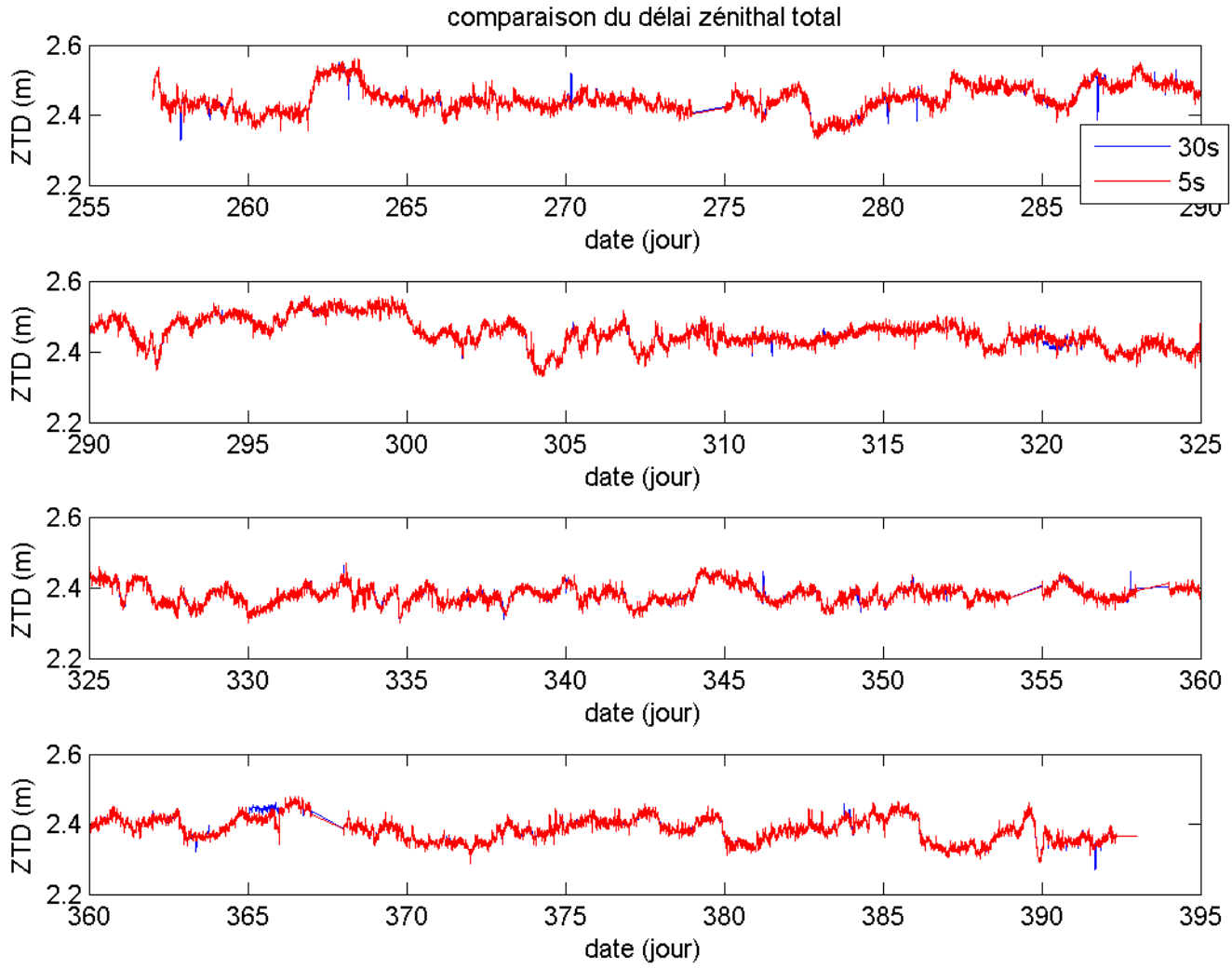


Figure 46 ✔ Comparaison des ZTD entre deux traitements 30s et 5s

On remarque que sur l'ensemble de la période de 136 jours les graphes se superposent mis à part les jours 320 et 365. Par contre on remarque que les pics qui sont apparus avec le traitement à 30s ont disparu avec un traitement à 5s. Le biais entre les deux séries est de l'ordre de 0.2 mm et un Emq de l'ordre de 6mm. Ces écarts sont faibles. On ne peut pas dire que le traitement à 5s soit meilleur qu'un traitement à 30s parce que les pics ont disparus. On a quand même une variation complète de la forme du graphe sur deux jours. Il nous faut une comparaison avec un résultat externe pour décider de la qualité du traitement. Mais on peut dire que les deux traitements donnent des résultats semblables.